Ciencia para las Políticas Públicas

Sequías

Coordinado por:
Sergio Martín Vicente Serrano · Santiago Beguería Portugués
Virginia Hernández-Santana · Juan José Durán Valsero
Miguel Ángel Rosales Villegas · Jesús Julio Camarero Martínez

CSIC
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
SCIENCE 4 POLICY

Ciencia para las Políticas Públicas

Informe de transferencia de conocimiento

CSIC
Consejo Superior de Investigaciones Científicas

Gobierno de España
Ministerio de Ciencia e Innovación

SCIENCE 4 POLICY

Este es un libro de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).
Más información sobre esta licencia en https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Las noticias, los asertos y las opiniones contenidos en esta obra son de la exclusiva responsabilidad del autor o autores. La editorial, por su parte, solo se hace responsable del interés científico de sus publicaciones.

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado:
https://cpage.mpr.gob.es

EDITORIAL CSIC: http://editorial.csic.es (correo: publ@csic.es)

Departamento de Comunicación
Gabinete de Presidencia
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Calle Serrano 117
28006 Madrid
Email: comunicacion@csic.es

NIPO: 833-23-081-9
e-NIPO: 833-23-082-4
Depósito Legal: M-20234-2023

Edición no venal

Coordinado por:
Sergio Martín Vicente Serrano
Santiago Beguería Portugués
Virginia Hernández Santana
Juan José Durán Valsero
Miguel Ángel Rosales Villegas
Jesús Julio Camarero Martínez

Coordinador de la colección Ciencia para las Políticas Públicas:
Alberto Mercado

Edición:
Esther M. García Pastor

Fotógrafos:
CSIC
EBD
INIA

Infografía:
Yolanda Clemente
Irene Cuesta

Diseño y maquetación:
David Pamplona Roche

Impreso en España. *Printed in Spain*

En esta edición se ha utilizado papel ecológico sometido a un proceso de blanqueado ECF, cuya fibra procede de bosques gestionados de forma sostenible.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.

EL CSIC tiene entre sus funciones la de informar, asistir y asesorar en materia de ciencia y tecnología a entidades públicas y privadas, según recoge el artículo 5 de su Estatuto. Enmarcado en esta función, el presente informe, *Sequías*, de la colección Ciencia para las las Políticas Públicas, se presenta como un documento dirigido a las administraciones y a la sociedad en general. En él se explican conceptos básicos sobre las sequías, desgrana sus impactos en la agricultura, los ecosistemas y la sociedad, y presenta las líneas de investigación más destacadas del organismo para la gestión del déficit de disponibilidad del agua.

Índice

uno

La sequía

1.1. ¿Qué es la sequía?

1.2. La huella humana: cambio climático y sobreexplotación

1.3. Impactos de la sequía

1.4. Convivir con la sequía: adaptaciones y soluciones

dos

La contribución del CSIC al estudio y adaptación de la sequía

2.1. La sequía desde una perspectiva climática

2.2. Adaptación de las plantas a la sequía y uso del agua en la agricultura

2.3. La sequía desde una perspectiva hidrológica

2.4. La sequía desde una perspectiva ecológica y ambiental

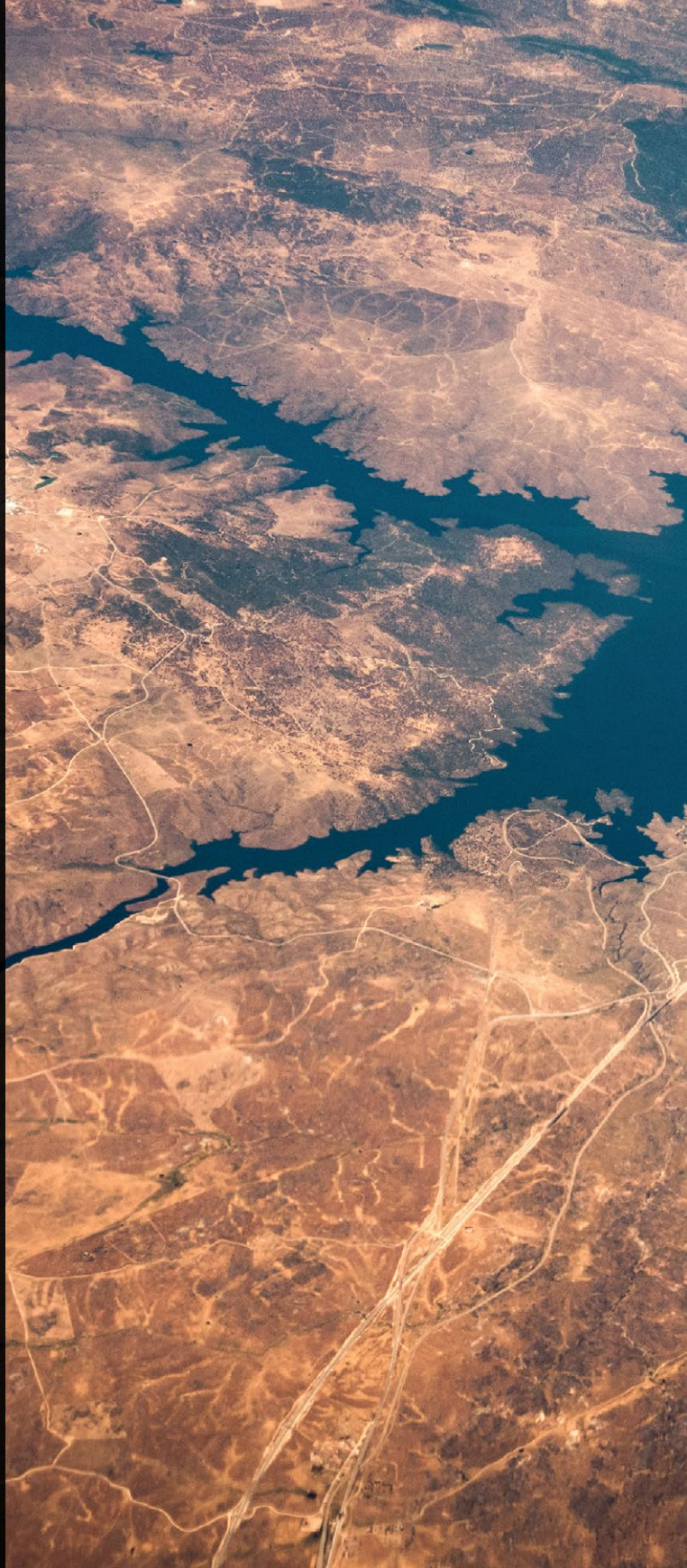
2.5. La sequía desde una perspectiva socioeconómica

tres

Conclusiones y recomendaciones

cuatro

Listado de centros



UNO

La sequía

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

La sequía es uno de los principales riesgos naturales que afectan a nuestro planeta. Afecta tanto a los ecosistemas naturales como a las sociedades de países desarrollados y en vías de desarrollo, e interactúa con el proceso de cambio climático. Cuando se piensa en desastres naturales relacionados con el clima es habitual referirse a ciclones tropicales, inundaciones, tornados u otros fenómenos, pero no se suele pensar en la sequía, a pesar de que a lo largo de la historia esta ha sido el fenómeno climático más letal y de que actualmente sigue matando a decenas de miles de personas en el mundo.

La sequía ha sido la causa de migraciones humanas, de conflictos bélicos y hasta de la desaparición de civilizaciones. Pocos fenómenos naturales se pueden comparar con la devastación causada por la sequía. Su extensión superficial suele superar la de cualquier otro desastre natural y sus efectos alcanzan la totalidad del ecosistema, con bosques moribundos, pastos agostados y, en los casos más extremos, desertificación y erosión del suelo. A estos efectos se suman los temidos incendios forestales, que se propagan de forma más rápida con una vegetación seca. Así, los animales mueren de sed o de hambre por falta de comida, y algunos pueblos observan cómo su modo de vida desaparece al no poder hacer frente a la sequía. Tendrán que elegir: pasar hambre o emigrar. La falta de agua puede arrastrar a la desesperación y a la pobreza durante años. Incluso en los países con economías saneadas, la sequía produce impactos muy negativos que se propagan por todo el sistema socioeconómico y llega a provocar conflictos sectoriales y territoriales.

Por ello, las experiencias previas en la gestión de la sequía a nivel regional, nacional o supranacional pueden contribuir a limitar el riesgo y a trazar estrategias eficientes para convivir con este desastre natural. De esta forma, en este informe, además de ahondar en las características, tipos y consecuencias de la sequía, se presentan las contribuciones que los investigadores e investigadoras del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) para resolver el reto global pero también regional de la sequía.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

1.1.

¿Qué es la sequía?

La sequía es una situación anómala en la que se produce un déficit en la disponibilidad de agua y que, consecuentemente, tiene un impacto negativo en los cultivos, los ecosistemas y la sociedad. Es muy difícil establecer umbrales fijos de duración o intensidad para definir la sequía. En algunos casos aparece de forma repentina, mientras que en otros se desarrolla en un periodo de tiempo prolongado. También es complicado evaluar el grado de déficit hídrico, pues la sequía puede darse en distintos ámbitos (agrícola, hidrológico, ecológico...), cada uno con sus propias características.

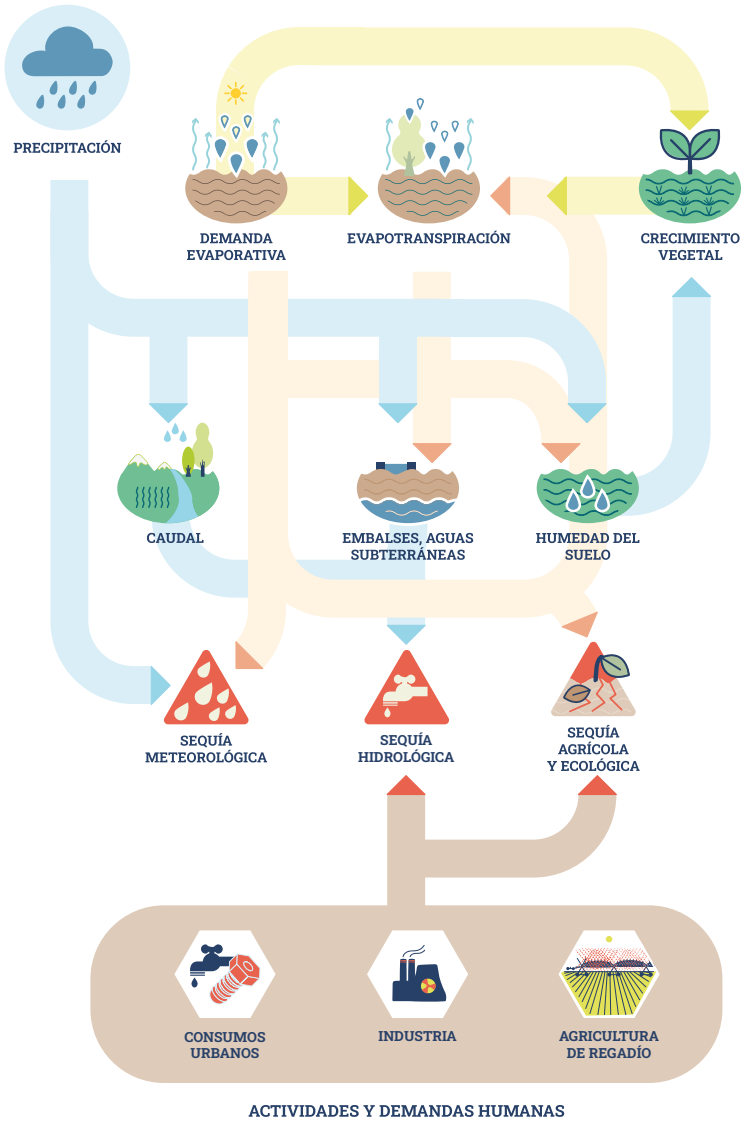
Conviene distinguir la sequía de otros conceptos relacionados, como la aridez, que hace referencia a las condiciones medias de humedad de una región. También es frecuente la confusión entre sequía y estación seca, que se produce de forma regular cada año en determinados climas y que no supone una anomalía, como el verano en el clima mediterráneo. Finalmente, la escasez de agua hace referencia a una situación crónica de falta de recursos hídricos a consecuencia de un exceso de demanda con relación a los recursos disponibles.

La sequía es, pues, un fenómeno muy complejo; aunque tiene un origen fundamentalmente hidroclimático en el que el déficit de precipitaciones cumple un papel preponderante, resulta muy difícil de cuantificar. De hecho, no es posible utilizar una única variable para caracterizar la sequía, ya que tienen lugar múltiples interacciones entre las condiciones climáticas, el suelo, la vegetación, la hidrología superficial y subterránea.

Además, la actividad humana puede afectar a la intensificación y propagación espacial y temporal de la sequía, ya que la gestión del territorio, los usos del suelo, la regulación de los recursos hídricos y las demandas de agua pueden reducir o aumentar su severidad. Por ejemplo, el desarrollo de una agricultura de regadío intensiva y poco eficiente en el uso del agua generará una presión notable sobre los recursos hídricos y podría aumentar la severidad de la sequía aguas abajo.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

Gráfico 1.1 Dimensiones de la sequía



Interacciones climáticas, ecológicas y humanas que dan lugar a la sequía. / IRENE CUESTA. MODIFICADO A PARTIR DEL SEXTO INFORME DE EVOLUCIÓN DEL GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO DE LAS NACIONES UNIDAS.

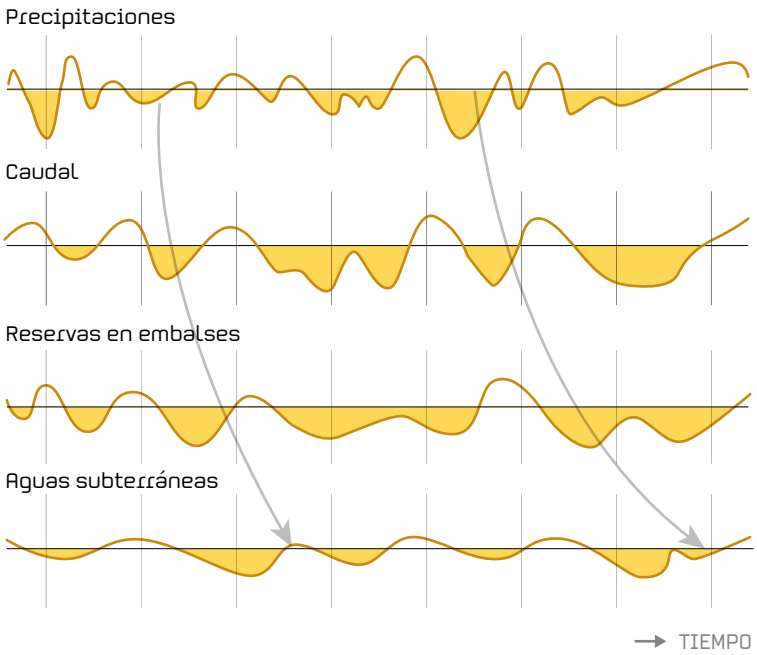
Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

La sequía tiene un carácter multidimensional, al producirse en diferentes sistemas socioeconómicos o ecológicos, y en distintas fases del ciclo hidrológico, por lo que existen diversos tipos. Podemos encontrarnos con una sequía meteorológica, en la que las precipitaciones se encuentran por debajo de los valores medios, y que puede agravarse por una mayor demanda de agua por la atmósfera; la sequía agrícola se caracteriza por la falta de humedad del suelo necesaria para el desarrollo de los cultivos, lo que da lugar a reducciones o pérdidas de cosechas; por su parte, la sequía ecológica o medioambiental se desencadena por la falta de agua disponible para la vegetación natural y supone un factor de impacto clave sobre los ecosistemas; la sequía hidrológica está relacionada con un descenso prolongado de diferentes fuentes de recursos hídricos, como los caudales, las reservas en embalses y las aguas subterráneas; finalmente, se habla de sequía socioeconómica si afecta a las sociedades y las economías en forma de restricciones de agua, baja productividad agrícola, encarecimiento de la energía, además de otros efectos indirectos.

Todos estos tipos de sequía suelen darse de manera encadenada, y es habitualmente la meteorológica la que da origen al resto. Sin embargo, esta causalidad entre sequías depende de múltiples factores, que incluyen las necesidades de agua de la vegetación natural y de los cultivos, el estado de conservación de los ecosistemas, las características de las cuencas hidrográficas, o la capacidad de regular y gestionar los recursos hídricos. Además, se producen retardos entre la ocurrencia de las sequías meteorológicas y la del resto de tipos, que suelen ser cortos en el caso de las agrícolas y más largos en de las hidrológicas, sobre todo cuando menoscaban las reservas de agua subterráneas o los embalses de gran capacidad.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

Gráfico 1.2 De la sequía meteorológica a la hidrológica



CSIC

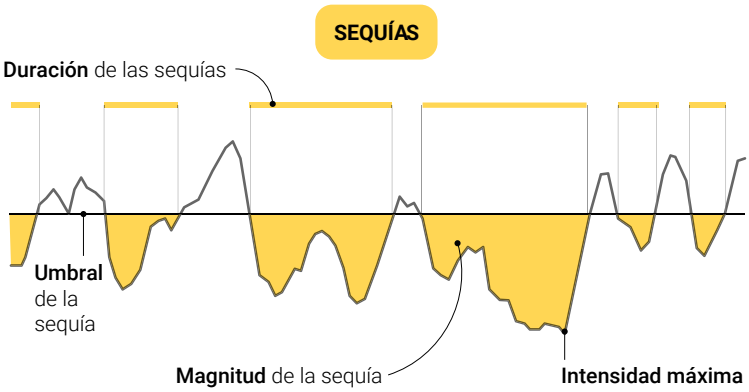
Para el estudio y monitorización de la sequía, se utilizan índices generados a partir de variables, a menudo climáticas, pero también hidrológicas (humedad del suelo, volumen embalsado, caudal de los ríos, nivel freático, etc.), y más recientemente de magnitudes que informan de la actividad vegetal medida a partir de imágenes de satélite. Gracias a estos índices, resulta

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

posible identificar un episodio de sequías atendiendo a sus principales componentes: duración, magnitud total del déficit, intensidad media y extensión superficial. Se suele hablar de *severidad* de la sequía como un valor no cuantitativo que reúne todas estas características del fenómeno y sus impactos asociados. Así, las sequías muy duraderas, de considerable importancia y que afectan a amplios territorios se suelen denominar *megasequías*. Además, la velocidad con la que se implanta una sequía es importante. En su mayor parte, precisan largos periodos con déficits de precipitación para su desarrollo, aunque también las hay caracterizadas por una rápida implantación, las *sequías repentinas*, que pueden dar lugar a impactos muy notables sobre la agricultura y los ecosistemas.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

Gráfico 1.3 Magnitud, duración e intensidad de la sequía



CSIC

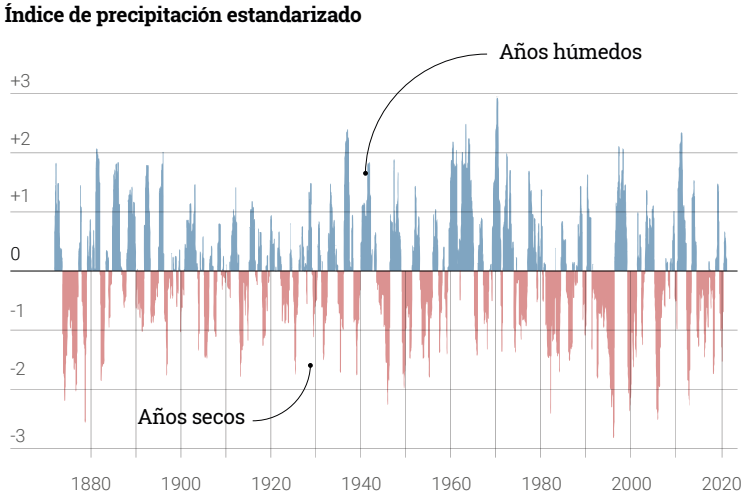
Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

1.2.

La huella humana: cambio climático y sobreexplotación

La sequía es un fenómeno que de manera recurrente se ha relacionado con la variabilidad natural del clima, controlado por la circulación atmosférica y por el transporte de humedad entre unas regiones y otras; y es de interés científico desde que se tienen registros meteorológicos tanto a nivel nacional como internacional. En las últimas décadas se han producido sequías muy severas en diferentes regiones del mundo, que inducen a pensar en una relación con el cambio climático. Sin embargo, el análisis de las series de precipitación de más de cien años disponibles a lo largo de todo el mundo muestra escasos cambios en la ocurrencia de déficits de precipitación de especial severidad. De hecho, en España, episodios como los de las primeras décadas del siglo XX no son extraños en el marco de los últimos 170 años.

Gráfico 1.4 Evolución temporal de la sequía



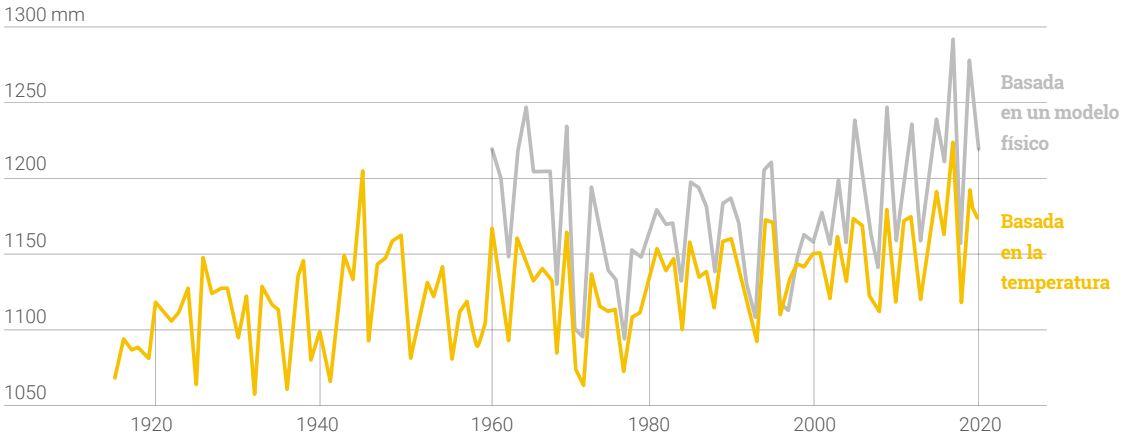
Evolución del índice de precipitación estandarizado promedio para España entre 1870 y 2020. / CSIC

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

Aunque los cambios en las precipitaciones son poco significativos, en las últimas décadas se ha registrado un notable incremento de la demanda de agua por parte de la atmósfera debido al aumento de la temperatura media

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Gráfico 1.4 La atmósfera demanda más agua



Evolución de la demanda de agua por parte de la atmósfera promedio para España desde 1916 a 2020. Se utilizan dos métodos para su estimación, siendo más robusto el modelo físico para el que existen los datos necesarios desde 1961.
/ CSIC

No obstante, además de los déficits de precipitación, existen otros factores climáticos que influyen en la sequía; el principal es la demanda de agua atmosférica, que depende de la temperatura del aire, su humedad relativa, la velocidad del viento y la radiación solar. En los periodos con déficit de precipitación, una alta demanda atmosférica aumenta la pérdida de agua por evaporación en los suelos, la vegetación y los embalses, e incrementa el estrés de la vegetación y los cultivos. Por ello, aunque los cambios en las precipitaciones son poco significativos, en las últimas décadas se ha registrado un notable incremento de la exigencia de agua por parte de la atmósfera debido al aumento de la temperatura media.

El incremento de la demanda atmosférica a escala global ha sido de más de 50 mm desde la década de 1980, pasando de 1240 mm/año a 1300 mm/año, como promedio. En algunas regiones del mundo este incremento ha sido mucho mayor. Es el caso de España, donde la demanda anual ha aumentado más de 120 mm desde 1960 y ha alcanzado los 1200 mm/año de promedio

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

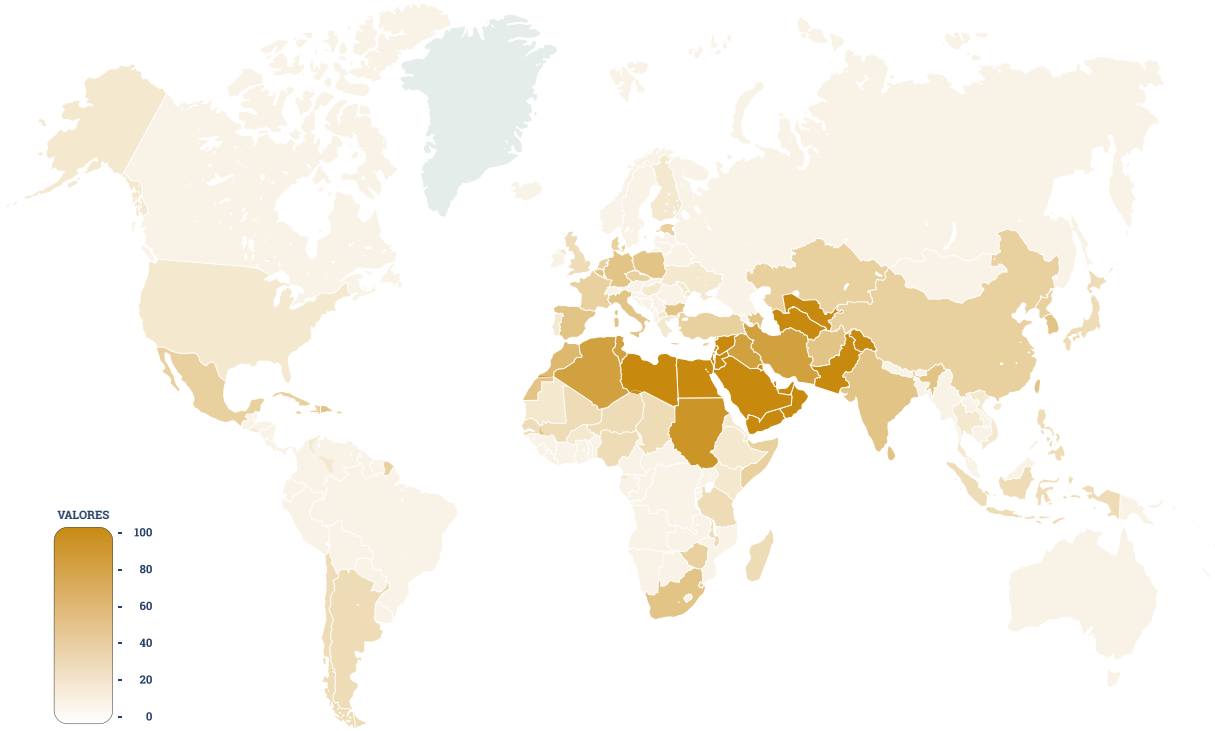
en la actualidad. Este hecho hace que, en momentos de escasa disponibilidad de agua, la severidad de la sequía se incremente, sobre todo en el caso de las sequías agrícolas y ecológicas.

Más allá del factor climático, otro elemento fundamental para comprender la evolución de la sequía y sus impactos es la gestión humana de los recursos hídricos. En la actualidad, existen cerca de 36 000 grandes presas en el mundo, tres veces más que las que había en 1960. En paralelo, el uso global de agua ha aumentado de 2000 km^3 a 4000 km^3 al año debido al crecimiento demográfico, el desarrollo económico y los cambios en los patrones de consumo. Si consideramos la evolución de la población mundial, sin embargo, la disponibilidad de recursos hídricos per cápita se ha reducido a la mitad en el mismo periodo. Estos datos son un buen indicador de la creciente presión sobre los recursos hídricos globales. En Europa, Norteamérica y Asia, el impacto de las sequías hidrológicas se ha incrementado hasta un 500 %, y su frecuencia en un 27 % a lo largo de las últimas décadas, debido fundamentalmente al aumento de los consumos humanos.

En España, el incremento de la frecuencia y severidad de las sequías hidrológicas ha sido muy notable. Numerosas cuencas que drenan al Mediterráneo muestran pérdidas de caudal de más del 50 % desde la década de 1960, porcentaje muy superior a los cambios atribuibles al cambio climático. Además, se ha incrementado la superficie boscosa en las zonas de cabecera de los ríos y la superficie regada, que ha pasado de un millón y medio de hectáreas en 1950 a más de tres y millones y medio en la actualidad. Aunque la capacidad de regulación de las cuencas fluviales en España ha mejorado de forma muy notable, pasando de menos de 15 000 hm^3 de capacidad en la década de 1950 a más de 55 000 hm^3 en la actualidad, durante los años secos se siguen sufriendo restricciones en el regadío debido a la enorme demanda de agua por parte de estas explotaciones, lo que ha hecho que la mayor parte de las cuencas mediterráneas de España presenten un déficit crónico en su disponibilidad de recursos hídricos.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Gráfico 1.5 Mapa del índice de explotación de los recursos hídricos en el mundo

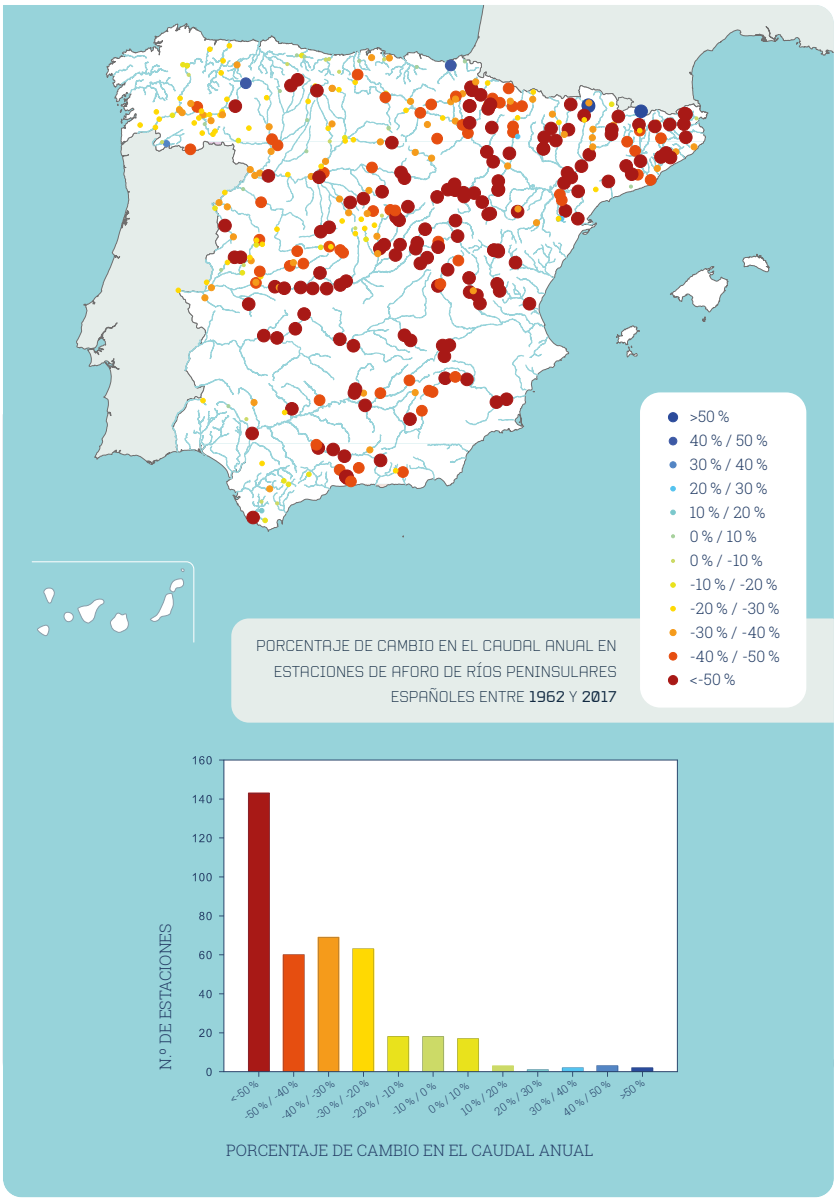


El índice de explotación de los recursos hídricos es la ratio entre el consumo de agua y los recursos hídricos renovables anuales. Los valores superiores al 50 % indican riesgo de padecer condiciones de escasez crónica de agua, pues no hay suficiente margen para contrarrestar la variabilidad de clima y sequía. / CSIC

De cara al futuro, se presentan grandes incertidumbres en la determinación de la evolución de las sequías. Las estimaciones de los modelos más recientes simulan diferentes escenarios de cambio climático y sugieren una evolución contrastada en función de las variables que se analizan. En el caso de las proyecciones de precipitación, los modelos apuntan a déficits de precipitación más frecuentes y duraderos en algunas regiones como Centroamérica, Sudáfrica, el oeste de Australia, Chile y la región mediterránea, incluyendo España. Sin embargo, independientemente de estas proyecciones aportadas por los modelos, cabe

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

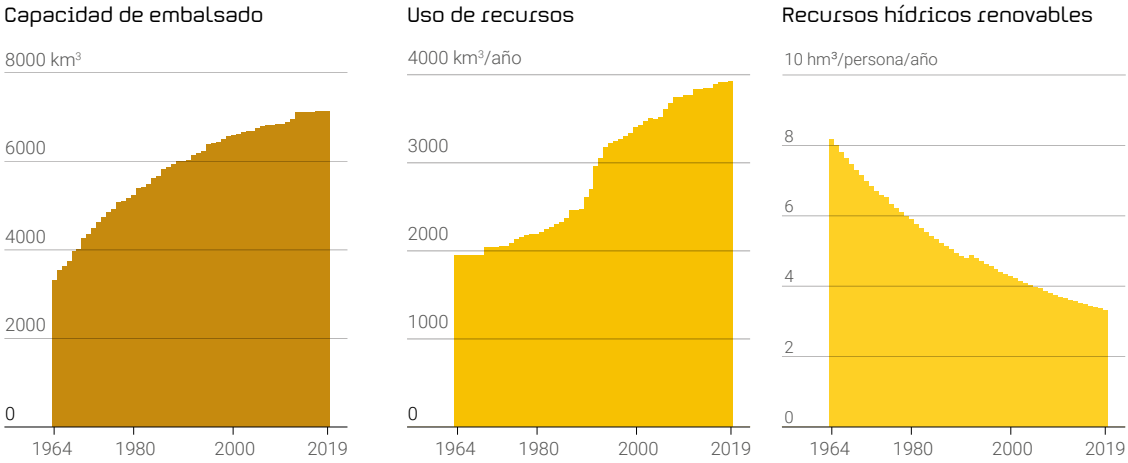
Gráfico 1.6 El caudal anual ha disminuido en la mayoría de los ríos de la España peninsular



IRENE CUESTA (CSIC)

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Gráfico 1.7 Evolución de los recursos hídricos en el mundo



CSIC

destacar que, incluso en regiones en las que se espera un aumento de las precipitaciones, se darán también periodos de déficit. Cuando se produzca esta escasez, la demanda atmosférica de agua debido al aumento de las temperaturas dará lugar a un incremento importante del estrés hídrico en la vegetación natural y los cultivos, y a menores recursos hídricos superficiales. En otras palabras, el aumento de las temperaturas producirá una demanda de agua por parte de la atmósfera superior a la media, provocando sequías más severas, mayor estrés en la vegetación y menos disponibilidad de recursos hídricos, sobre todo en las regiones de clima seco.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

1.3. Impactos de la sequía

La cuantificación de los impactos de la sequía es urgente, pues, aunque apenas existe información sobre ello, resulta esencial para evaluar y mitigar los riesgos que derivan de este fenómeno que, si bien afecta a países y regiones con muy diferentes niveles de renta, tiene consecuencias extraordinarias en los países en desarrollo. Según las cifras de Naciones Unidas, entre 1970 y 2019 la sequía ha sido uno de los fenómenos naturales que mayor número de muertes ha causado, unas 650 000. Además, se estima que alrededor de 55 millones de personas se ven afectadas por la sequía cada año, lo que conlleva preocupantes crisis humanitarias.

En los países desarrollados, los impactos de la sequía se asocian principalmente a pérdidas económicas, que pueden resultar muy cuantiosas. Se estima que se pierden aproximadamente 9000 millones de euros en la Unión Europea (UE) y 6400 millones de dólares en los Estados Unidos. En la UE, las pérdidas más altas se producen en España (1500 millones de €/año), Italia (1400 millones de €/año) y Francia (1200 millones de €/año). Dependiendo de la región, los impactos en Europa se concentran principalmente en la agricultura (39 %-60 %), seguido por el sector energético (22 %-48 %) y los abastecimientos urbanos (9 %-20 %). Los impactos resultan particularmente severos en regiones donde la agricultura o la ganadería tienen un peso económico importante. En definitiva, la sequía afecta transversalmente a los ecosistemas y la biodiversidad, a la actividad agrícola y ganadera y, en consecuencia, a la economía y la sociedad. Veamos cuáles son los efectos del déficit de disponibilidad del agua.

Impactos en la agricultura, ganadería y la producción de alimentos

La sequía reduce el crecimiento y el rendimiento de las plantas debido principalmente a la pérdida de la turgencia celular, la reducción de la asimilación de CO_2, el estrés oxidativo y el desequilibrio nutricional. Esto supone un grave problema para la productividad de los cultivos, ya que el agua es clave para multitud de procesos en las plantas que determinan su crecimiento y desarrollo. Esas dificultades desembocan en una disminución de la producción de alimentos, lo que provoca un aumento de los

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

Campo de maíz arrasado por la sequía. / ISTOCK

precios de productos básicos y la pérdida de ingresos para los agricultores.

La sequía afecta a las plantas tanto en las raíces como en las hojas debido a la falta de agua en el suelo y a la alta demanda atmosférica. A corto plazo, las plantas responden a la falta de agua regulando diversos procesos, como la apertura estomática, el transporte de agua o la presión de turgencia. Sin embargo, si la sequía persiste, las plantas realizan ajustes en el crecimiento de la raíz y el área foliar a través de respuestas complejas a nivel molecular, celular y fisiológico que buscan conservar agua y adaptarse a la sequía.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

El impacto de la sequía depende del momento del ciclo de desarrollo de las plantas en el que ocurra y, por tanto, tendrá una repercusión diferente en la producción de alimentos. Durante la germinación y establecimiento de las plántulas, la sequía retrasa el desarrollo desde la semilla y limita el crecimiento. En la etapa vegetativa, reduce el desarrollo de la planta y altera su morfología, lo que afecta a la calidad de cultivos como las verduras de hoja. Durante la reproducción, causa aborto de flores y granos, disminuyendo la formación de frutos y semillas. Además de estos efectos directos, la sequía aumenta la incidencia de plagas y enfermedades en los cultivos, ya que las plantas debilitadas son más susceptibles a sufrir estos daños. También reduce la actividad de microorganismos beneficiosos en el suelo, lo que impacta sobre la disponibilidad de nutrientes para las plantas, llevando a una disminución en la fertilidad del suelo a largo plazo y empeorando la producción.

La calidad y cantidad de las producción agrícola se ve mermada por la sequía. / ISTOCK

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

Vaca pastando en un campo afectado por sequía. Esto merma la calidad del alimento de los animales de la ganadería. / ISTOCK

La sequía afecta también directamente a la ganadería al reducir la disponibilidad de pastos y comprometer la producción de cultivos claves para su alimentación (maíz, soja, trigo, alfalfa, etc.), lo que dificulta la nutrición del ganado. Esto tiene importantes implicaciones económicas y nutricionales para la industria ganadera. Además, la sequía impacta en la práctica de la trashumancia, un sistema tradicional de pastoreo que depende del acceso a puntos de abastecimiento de agua durante los desplazamientos estacionales de los rebaños. Estos impactos dificultan los desplazamientos y pueden llevar a la concentración de animales en áreas limitadas, aumentando la presión sobre los recursos disponibles y contribuyendo a la degradación del suelo.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Vista aérea de la laguna de Santa Olalla en Doñana el 2 de septiembre de 2022, afectada por la sequía y la sobreexplotación.
/ ESTACIÓN BIOLÓGICA DE DOÑANA

Impactos hidrológicos

La sequía puede alterar significativamente el ciclo hidrológico: reduce la disponibilidad de recursos hídricos e influye en la calidad de los mismos. La escasez de recursos hídricos tiene consecuencias directas en los ecosistemas asociados a las masas de agua, pero también afecta al riego, el abastecimiento de agua potable, la generación de energía hidroeléctrica y a actividades industriales; todo ello repercute negativamente en la economía y en la sociedad en su conjunto.

Además, la sequía causa una mayor concentración de los elementos disueltos en el agua, especialmente nitrógeno y fósforo, lo que puede resultar en un crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas que provoca la eutrofización de la masa de agua, es decir, el agotamiento del oxígeno disuelto. Este hecho perjudicial

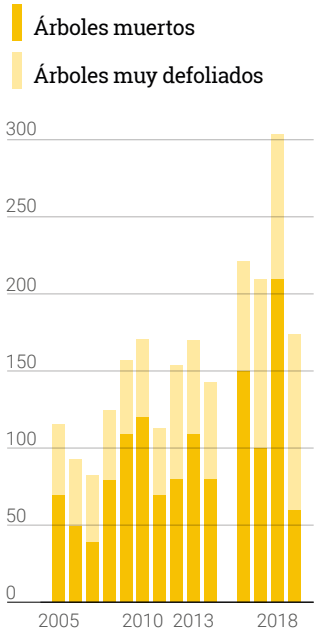
© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

a los ecosistemas acuáticos compromete la disponibilidad de agua potable para uso humano. También las aguas subterráneas registran cambios notables en su composición química a causa de la sequía. Las aguas más profundas salen a la superficie con una peor calidad química. Igualmente, en los acuíferos costeros, la escasez de recarga de agua dulce provoca salinización, lo que hace inviable el mantenimiento de cultivos que se nutren de estas masas de agua.

Impactos ecológicos

La sequía reduce el crecimiento de las plantas y su capacidad para captar carbono, lo que da lugar a fenómenos de decaimiento y mortalidad forestal y a que, durante los episodios de sequía, los bosques pasen de ser sumideros a fuentes de CO_2. Esta circunstancia conlleva efectos nefastos sobre los servicios que proveen los ecosistemas. Así, la fijación de carbono, la regulación del ciclo del agua, el mantenimiento de la diversidad de la fauna y la flora, la generación de productos madereros o la composición del paisaje, todas ellas funcionalidades de un ecosistema, se ven amenazadas por la sequía. A esto se une el hecho de que las zonas naturales secas constituyen un preocupante combustible para los incendios forestales, sobre todo, tras años húmedos en los que se acumula una gran cantidad de biomasa. La sequía además debilita los árboles y los hace más vulnerables a insectos defoliadores, que incrementan los daños directamente asociados a esta anomalía. También afecta negativamente a los pastos de los que se alimentan los animales del sector ganadero, lo que añadiría otro problema económico derivado de la situación. La fauna es otra gran perjudicada; en la medida que se reduce el potencial reproductivo de los árboles, las poblaciones de animales herbívoros y frugívoros que se alimentan de semillas y frutos se ven castigadas, al igual que las poblaciones de animales carnívoros o carroñeros que se alimentan de ellos.

Gráfico 1.8
Parcelas con árboles afectados por sequía en España



CSIC

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Impactos socioeconómicos indirectos

La sequía afecta de manera indirecta a la sociedad y la economía. Esta puede llegar, incluso, a provocar la interrupción de las cadenas de suministro locales y globales, y de las actividades de producción, lo que puede generar desempleo temporal o permanente y pérdida de ingresos. Además, la sequía puede llevar a la transmisión de enfermedades debido a la mala calidad del agua y del aire, la inseguridad alimentaria, la desnutrición y, en casos extremos, el hambre y la hambruna generalizada. Este contexto desfavorable empuja a las poblaciones a una migración interna o transfronteriza, con el consecuente aumento del riesgo de conflictos sociales en la región o el país receptor.

Más allá de las enfermedades transmitidas, la mala calidad del agua conduce a problemas cardiovasculares y respiratorias, lesiones, afecciones renales, cáncer de esófago, trastornos de salud mental y mortalidad. Los efectos más perjudiciales de la sequía en la salud a menudo recaen de manera desproporcionada en niños, población de edad avanzada, mujeres embarazadas, pacientes crónicos, trabajadores al aire libre, personas marginadas o personas empobrecidas. Por otro lado, la sequía puede tener diferentes efectos en mujeres y hombres; las mujeres son especialmente vulnerables en países en desarrollo porque se enfrentan a la discriminación: salarios más bajos, oportunidades limitadas de educación y exclusión de los procesos políticos y de toma de decisiones.

Los impactos de la sequía en España

España ha sido un país tradicionalmente vulnerable a la sequía. Son numerosos los documentos históricos sobre sus dramáticos efectos sobre la sociedad de cada época. Debido a la enorme dependencia del sector agrícola a la cantidad de precipitación, la sequía ha causado hambrunas, excesos de mortalidad y descensos de natalidad. Registros visigodos documentan que en el año 641 la sequía fue tan severa que tras siete años de déficit de precipitación murieron la mayor parte de los olivares de la provincia romana de Bética. Otro ejemplo son las sequías que afectaron al valle del Ebro entre 1641 y 1654, que causaron un notable incremento de los precios del cereal y de bajas en la población.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

La sequía que azota Cataluña ha descubierto el antiguo pueblo inundado por las aguas del pantano de Sau, que en abril de 2023 se encontraba al 6,6 % de su capacidad. / ISTOCK

Los importantes efectos demográficos de la sequía se llegaron a registrar incluso en el siglo XX. De hecho, la última gran hambruna provocada por una sequía en España se produjo en 1946, coincidiendo con el periodo de autarquía económica del franquismo, y que trajo consigo varios miles de muertos. Con el desarrollismo de las décadas de 1950 y 1960, que transformó España de un país fundamentalmente agrario y rural a otro predominantemente urbano e industrial, la vulnerabilidad social y demográfica a la sequía disminuyó. Desde entonces, aunque los impactos de las sequías posteriores han sido importantes, estos se han restringido a los ámbitos económico y ambiental. En los últimos 75 años nadie ha muerto de hambre por la sequía en España. En las últimas décadas, la sequía agrícola ha pasado a ser secundaria y es la hidrológica actualmente la más relevante por su papel en el abastecimiento urbano, la producción de hidroelectricidad y el regadío agrícola, que no ha dejado de crecer tanto en extensión como en relevancia económica.

En España no existe un registro directo de los impactos causados por la sequía, por lo que su estimación resulta complicada.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Sin embargo, las cifras de algunos sectores son suficientemente representativas de las enormes pérdidas económicas que produce, a lo que se suman problemas de abastecimiento y una importante alarma social. Las sequías de 1980-1983 y 1991-1995 conllevaron notables problemas de abastecimiento de agua en los núcleos de población, sobre todo, en el centro y sur de España.

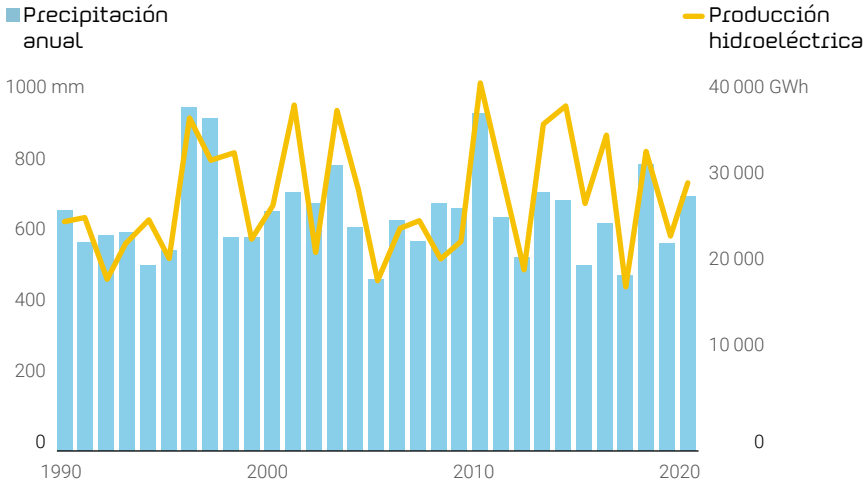
La producción hidroeléctrica se ve enormemente afectada también por la sequía. Por ejemplo, la breve pero muy intensa sequía de 2005 produjo un notable descenso de la producción hidroeléctrica hasta los 18 000 GWh (gigavatio/hora) anuales, que ha constituido la cifra más baja desde que existen registros, en 1965.

El sector que se ve más afectado por la sequía en España es el agrario, sobre todo la agricultura de regadío, muy ligada a las condiciones de sequía hidrológica. El cultivo de secano, aunque sufre pérdidas importantes durante los años secos, tiene un impacto económico muy inferior. Por ejemplo, 2012 fue el año en el que el pago por seguros agrarios en cultivos herbáceos de secano resultó más elevado, con 210 millones de euros. Estas cifras, aunque cuantiosas, no son comparables a las pérdidas por falta de agua en las zonas de regadío, que se pueden cifrar en varios miles de millones de euros en una sola región de España.

A estos impactos directos de la sequía agrícola hay que sumar otros indirectos, que son difícilmente cuantificables. Un estudio sobre los efectos económicos directos e indirectos de la sequía de 2005 en el valle del Ebro estimó un descenso de las producciones agrícolas de 405 millones de euros. Sin embargo, dichas pérdidas se propagaron en diferentes sectores, dando lugar a más de 300 millones de pérdidas indirectas debido a sus efectos sobre la industria agroalimentaria o la maquinaria agrícola. Además, la sequía causó la pérdida directa o indirectamente de más de 11 000 puestos de trabajo.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

Gráfico 1.9 Precipitación y producción hidroeléctrica



Evolución de la precipitación y la producción hidroeléctrica anual en España entre 1990 y 2020 / CSIC

La sequía es responsable de la mitad de los perjuicios registrados en los bosques españoles (defoliación, pérdida de biomasa, declive), seguida de factores bióticos de estrés (insectos, patógenos) —responsables del 24 % de los daños—, tal como muestran los seguimientos a través de redes autonómicas, nacionales o europeas de sanidad forestal. Hasta el 80 % de estos bosques afectados se recuperan en uno o dos años; el restante puede tardar más. Por último, aunque la biomasa forestal española ha aumentado considerablemente en los últimos sesenta años, se han generado paisajes cada vez más susceptibles a los impactos de las sequías y los incendios.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

14.

Convivir con las sequías: adaptaciones y soluciones

La gestión de la sequía

Dados los enormes impactos sociales y económicos de la sequía, las diferentes administraciones suelen tomar medidas enfocadas a mitigar sus efectos. Habitualmente, estas son reactivas, es decir, son medidas que se adoptan cuando la sequía está ocurriendo, y, en general, son poco efectivas, a menudo están mal coordinadas y su capacidad para la reducción de la vulnerabilidad y el riesgo es escasa. El hecho de que las actividades socioeconómicas se desarrollen sin considerar el riesgo de sequía y de que, cuando esta tiene lugar, las disposiciones de las administraciones públicas para paliar sus efectos sean los subsidios, la reducción de impuestos o los créditos es la peor manera de crear una sociedad resiliente a este fenómeno.

En las últimas décadas se ha puesto el foco en la necesidad de mejorar la planificación, preparación y recuperación ante la sequía. En general existen tres pilares fundamentales para una adecuada gestión integral del riesgo de sequía:

- La monitorización y alerta temprana.
- La evaluación de la vulnerabilidad de la sequía y del riesgo asociado.
- La mitigación, preparación y respuesta.

De hecho, para gestionar el riesgo de sequía de forma eficiente, es muy importante comprender los impactos derivados, qué ecosistemas y sociedades están en riesgo y por qué. Además, para que la toma de decisiones integral sea eficaz es necesario que se inserte en una serie de ciclos iterativos de revisión que impliquen una mejora de las estrategias una vez se ha producido una sequía. Las estimaciones más actuales sostienen que el beneficio de llevar acciones proactivas en este sentido supera entre dos y diez veces el coste que conlleva implementar medidas reactivas.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

Gráfico 1.10 Los pilares de la gestión de la sequía

IRENE CUESTA (CSIC)

La experiencia de la gestión de la sequía en España

La elevada vulnerabilidad de España a la sequía ha hecho que su población se haya adaptado a esta anomalía de diferentes formas a lo largo de la historia. Ejemplo de ello son los vestigios de numerosas presas romanas y de zonas de regadío de época árabe que han llegado hasta nuestros días. También desde la década de 1950 se han desarrollado numerosas acciones para tratar de limitar la vulnerabilidad del país a la sequía.

España ha sido un país pionero en el desarrollo de medidas de adaptación de la agricultura de secano y de la ganadería extensiva. La más destacada fue la puesta en marcha de un seguro agrario en 1982, coordinado por la Entidad Estatal de Seguros Agrarios, que ha resultado ser muy útil y que se sigue contratando frecuentemente en la actualidad. El principal porcentaje de este aseguramiento corresponde a cultivos de secano, con cerca de un 40 % del total. Además, existe un seguro de pastos, georreferenciados mediante imágenes de satélite, que cubre los insumos extraordinarios que los ganaderos deben aportar en forma de pienso al ganado cuando el pasto no crece por la sequía.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Campo de almendros y rebaño de ovejas. España ha sido un país pionero en el desarrollo de medidas de adaptación de la agricultura de secano y en la ganadería extensiva. / ISTOCK

En España, además, se han desarrollado estrategias para pasar de una agricultura convencional, propensa a la pérdida de agua, a una agricultura de conservación que se basa en una disminución drástica (incluso supresión) del laboreo intensivo para mantener la estructura del suelo y favorecer la conservación de la humedad y fertilidad. La agricultura de conservación busca mejorar la productividad de los cultivos a largo plazo mediante el uso de una cobertura vegetal permanente del terreno, una alteración mínima del suelo y la rotación de cultivos. Esta técnica puede suponer un 10 % de ahorro de agua en la agricultura española y evita la contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

Además, junto con la rotación de cultivos y la diversificación, otra de las principales medidas desarrolladas es la elección de variedades adaptadas a la disponibilidad de agua. Esto es posible gracias a las técnicas de mejora genética para seleccionar o crear nuevos cultivos más resistentes a la sequía, o bien mediante el uso de variedades tradicionales que habían caído en desuso debido a su menor productividad, pero que poseen mayores rasgos de resistencia y capacidad de recuperación. En los últimos años, el desarrollo de técnicas de mejora genética punteras, basadas en los avances en biotecnología, biología molecular y secuenciación de genomas, ha generado en España un valor añadido bruto en la economía de unos 1000 millones de euros anuales y una fuerte reducción del consumo de agua debido a la adaptación de las variedades al estrés hídrico.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

El desarrollo de técnicas de fitomejoramiento ha generado en España un valor añadido bruto en la economía de unos 1000 millones de euros anuales. / ISTOCK

Dentro del marco de una agricultura intensiva sostenible, se han aplicado mejoras significativas en los sistemas de riego, tanto con infraestructuras hidráulicas más eficientes como con la implementación de tecnologías innovadoras, como los sistemas de riego localizado. Estas mejoras buscan aumentar la productividad agrícola con el menor impacto posible en el medioambiente, ya que minimizan las pérdidas de agua y reducen la evaporación del agua del suelo.

Desde un punto de vista ecológico, en España se han puesto en marcha medidas de adaptación para reducir la vulnerabilidad de los ecosistemas, especialmente en el caso de los bosques, que ocupan casi el 30 % del territorio nacional. Aunque muy localizadas, se han puesto en marcha medidas para crear bosques menos densos, estructural y funcionalmente más diversos para mitigar los impactos negativos de las sequías. La tala selectiva o incluso las quemas prescritas, que reducen la densidad y área basal o contribuyen a crear bosques más diversos y heterogéneos, ayudan a reducir la competencia entre árboles por el agua del suelo. Además, el uso de matorrales «nodriza» para facilitar la regeneración de ciertas especies de árboles es otra medida de gestión adaptativa.

En España existen sistemas agroforestales, como las plantaciones de encinas truferas, en las que el uso de riego por goteo está muy extendido, pues la sequía reduce la producción y la calidad

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

de la trufa. En otros sistemas, como los pastos, existen también alternativas de adaptación viables: la selección de especies o variedades resistentes frente a la sequía, caso de algunas leguminosas, o la selección y aplicación de microbiota edáfica que permite un uso más eficiente de agua y nutrientes. Finalmente, en sistemas de transición, como los bosques de ribera, especialmente amenazados en casi toda Europa por su conversión en terrenos urbanos y agrícolas, es fundamental el mantenimiento de caudales ecológicos y de un régimen estacionalmente marcado, ya que los árboles (chopos, álamos, fresnos) son muy sensibles al estiaje y al descenso del nivel del freático en primavera.

Ya que actualmente la principal dimensión de la sequía en España es hidrológica, en las últimas décadas se ha puesto el foco en su gestión y en la adaptación cuando sobreviene. Esta gestión comenzó con el regeneracionismo político de inicios del siglo XX, que fue la base del desarrollo de una política estatal por la planificación y la financiación de obras hidráulicas. Desde la década de 1950, se ha incrementado de manera considerable la capacidad de regulación hidrológica en España con la finalidad de aumentar la disponibilidad y amortiguar los déficits durante los años de sequía. Sin embargo, esta mejora de regulación hídrica ha ido de la mano de un extraordinario aumento de la superficie regada.

Frente al imperativo de aumentar los recursos hídricos disponibles mediante la regulación, el Programa Marco del Agua de la Unión Europea, adoptado en 2000, ha constituido una nueva perspectiva para la política y gestión de la sequía. En su directiva se indicó la necesidad de complementar los planes de gestión de las cuencas hidrográficas mediante programas específicos de gestión de la sequía en este territorio. España ha sido un país pionero en el desarrollo de estos planes de cuenca, que han sido una herramienta indispensable para la toma de decisiones durante las sequías hidrológicas de la última década, en la medida en la que han contribuido a limitar las restricciones de agua en los abastecimientos a los núcleos de población mediante una mejor gestión de los regadíos. Los planes de sequía se basan en la disponibilidad de información en tiempo real sobre las condiciones hidrológicas de cada cuenca, son independientes y se adaptan a las características específicas de cada una de estas, pero en todos los casos se utiliza el mismo concepto para la mo-

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

España ha sido un país pionero en el desarrollo de planes de sequía de cuenca, que han contribuido a limitar las restricciones de agua en los abastecimientos a los núcleos de población mediante una mejor gestión de los regadíos

Copia gratuita / Personal free copy — http://libros.csic.es

nitorización de la sequía. Los planes incluyen programas de medidas y un marco organizativo para la gestión de la sequía en cada subunidad, que incluye a los agentes clave de la misma. En condiciones de prealerta y alerta, se establecen diferentes prioridades en la asignación de los usos del agua, siendo el abastecimiento a la población siempre prioritario. La implementación de los planes de sequía comenzó en 2007, se revisaron en el año 2017 y, actualmente, en el año 2023, están en su segundo ciclo de revisión.

Además de los planes de sequía, las administraciones públicas responsables del abastecimiento urbano en núcleos de población de más de 20 000 habitantes deben tener planes de contingencia frente a la sequía. Estos planes incluyen diferentes restricciones y medidas para reducir el consumo de agua y garantizar el abastecimiento de acuerdo a diferentes escenarios de sequía. Habitualmente, los planes urbanos incluyen medidas como reducir las frecuencias de riego, prohibir el llenado de piscinas, alternancia en las fuentes de agua, etc. Además, en las principales ciudades de España, se han puesto en marcha acciones para reducir el consumo del agua, en algunos casos incrementando el precio del metro cúbico de agua, pero también iniciando campañas de educación sobre el consumo responsable, instalando contadores individuales, promocionando tecnologías de ahorro o controlando conexiones ilegales a la red de suministro. El resultado ha sido que desde inicios del siglo XXI se ha asistido a una progresiva y continua reducción en el consumo de agua per cápita, pasando de los más de 160 m^3/año en 2000 a menos de 120 m^3/año en la actualidad.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

Finalmente, hay que destacar que, a pesar del cambio que ha supuesto la Directiva marco del agua y los planes de sequía en España, la gestión en el tema que nos ocupa sigue siendo fundamentalmente reactiva en la actualidad: desarrollo de reales decretos de ley y de créditos, por parte de los gobiernos regionales, para subvencionar las pérdidas en los sectores afectados, fundamentalmente el agrario. Además, estas medidas suelen estar acompañadas de anuncios de más infraestructuras reguladoras o incluso de trasvases entre cuencas. Se ha llegado a la paradójica situación de que, aunque aumenta la regulación hidráulica, se implementan otras medidas (como la modernización de regadíos, la construcción de plantas desaladoras e incluso la reutilización de aguas residuales), y hay una adhesión de España a la Directiva marco del agua pionera, la demanda sigue siendo considerablemente elevada en estos momentos, debido al enorme incremento de las superficies regadas y al proceso de intensificación de los regadíos. Es este factor el que impide hacer frente a las demandas durante los años secos y explica que actualmente el sistema hidrológico español y la agricultura de regadío sean tan vulnerables a la sequía.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

dos

La contribución del CSIC al estudio y adaptación a la sequía

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

Desde diferentes institutos del CSIC, se lleva trabajando desde hace décadas en diferentes líneas de investigación directa o indirectamente relacionadas con la sequía, que han supuesto un considerable avance para el conocimiento multidisciplinar sobre el tema, con vistas a la adopción de medidas necesarias que permitan mitigar sus efectos y adaptarnos a ella.

Prueba del simulador de sequías creado por equipos del CSIC. / INIA

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

2.1.

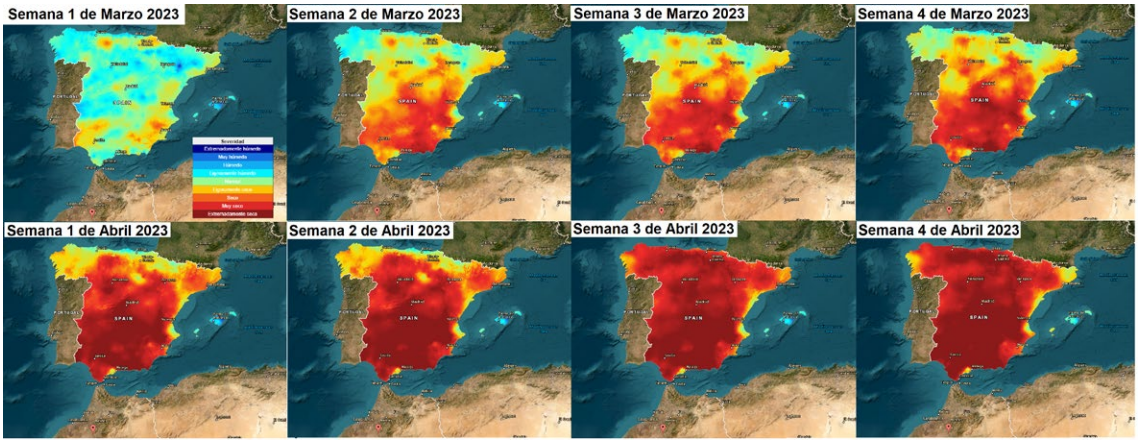
La sequía desde una perspectiva climática

La enorme complejidad de la sequía ha hecho necesaria una intensa investigación para desarrollar herramientas que permitan cuantificarla de forma objetiva y comparar su severidad en regiones de características hidroclimáticas diferentes. Desde el CSIC se ha trabajado en esta dirección desarrollando índices que cuantifican las sequías meteorológicas. En particular, el *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* permitió incluir el efecto de la demanda de agua por parte de la atmósfera en la cuantificación de la sequía. Actualmente, este indicador se ha convertido en un estándar para cuantificar los periodos secos y se utiliza en estudios científicos por investigadores de todo el mundo y por servicios de meteorología nacionales para el desarrollo de sistema de monitorización y alerta temprana del riesgo. Junto con este indicador, de gran uso, se ha desarrollado el *Standardized Evapotranspiration Deficit Index*, con un gran potencial para diagnosticar sequías agrícolas y ecológicas al basarse en el déficit de evapotranspiración, que es la diferencia entre el agua que las plantas transpiran realmente y aquella que demanda la atmósfera, por lo que se convierte en un excelente indicador de estrés en la cubierta vegetal.

Además del desarrollo de indicadores, se han desarrollado metodologías para estimar de forma más precisa la peligrosidad de sequías climáticas de diferente intensidad, lo que permite la creación de cartografías de probabilidad para la mejor evaluación del riesgo. También se han desarrollado métodos para una mejor cuantificación de las sequías repentinas, asociadas fundamentalmente a episodios de olas de calor.

Uno de los pilares fundamentales para la puesta en marcha de planes eficientes de gestión de sequías es la disponibilidad de información en tiempo real sobre la severidad, extensión superficial y el tipo de sequía que se está produciendo. Ya que las predicciones de las condiciones presentan incertidumbres significativas, conocer en qué medida la sequía afecta con una mayor o menor severidad a diferentes regiones y cómo está evolucionando, tanto en relación a su distribución espacial como a su intensidad, permite mejorar la gestión del riesgo. El CSIC fue pionero en el desarrollo de sistemas de monitorización de sequías a escala global, con el lanzamiento de un monitor global de sequía en 2012 basado en el *Standardized Precipitation Evapotranspiration*

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados



Desarrollo de la sequía de 2023 en España a partir del monitor de sequía meteorológica y el *SPEI* a la escala temporal de tres meses.
/ CSIC

Index (SPEI). Este monitor permite conocer de forma actualizada la situación de las condiciones de sequía en todo el mundo. Dada su gran utilidad, ha sido empleado por organismos y empresas internacionales durante los episodios de sequía. Además, recientemente el CSIC también ha generado un monitor más avanzado, que se actualiza con una mayor frecuencia temporal y presenta una mayor resolución espacial y coherencia física, lo que ayuda a determinar las condiciones de sequía en regiones en las que diferentes cultivos resultan dominantes.

A escala nacional, los investigadores han desarrollado recientemente un sistema de monitorización de la sequía meteorológica que permite determinar con una frecuencia temporal semanal y a una resolución espacial de un kilómetro. Este sistema se ha transferido a la Agencia Estatal de Meteorología para monitorizar la sequía meteorológica en España.

Aunque la predicción estacional de las sequías basada en modelizaciones climáticas es un aspecto muy complejo, desde el CSIC se ha investigado en esta línea con el objetivo de buscar una mejora en la predicción de las sequías que responden a situaciones atmosféricas específicas. La mejora de los procedimientos estadísticos se aplica a los modelos de predicción estacional para mejorar su confianza y la determinación de la conexión entre la cubierta de nieve en el hemisferio norte y su impacto sobre la predicción de las precipitaciones en Europa durante el invierno.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Este análisis pretende mejorar la predicción estacional de las sequías en un futuro, con el fin de reforzar la preparación y gestión del riesgo.

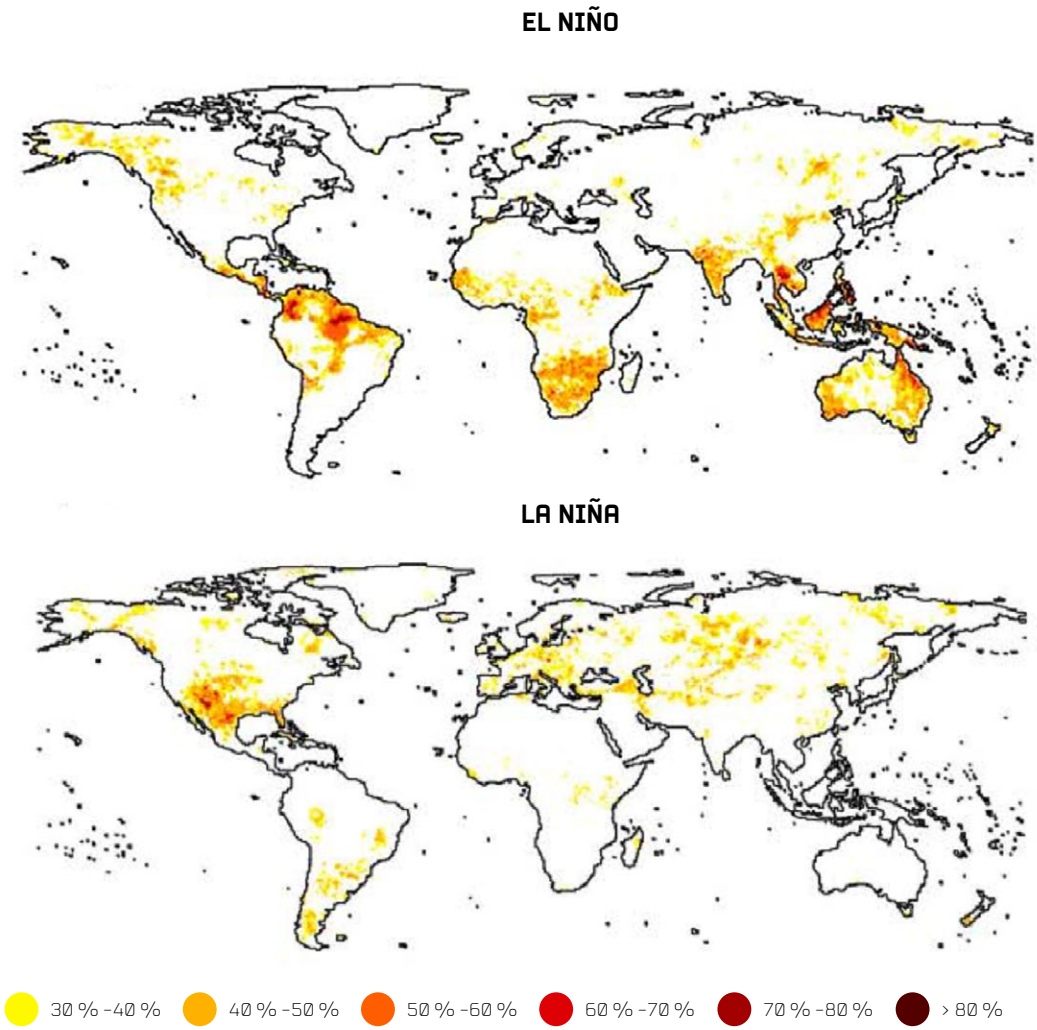
Dada la elevada incertidumbre que presenta la predicción de las sequías, resulta necesario avanzar en el conocimiento de los mecanismos físicos que dan lugar a su ocurrencia, ya que averiguar qué conexiones existen entre la dinámica atmosférica y su génesis es un paso previo necesario al desarrollo de modelos predictivos más eficaces. Investigadores del CSIC trabajan desde hace más de una década en el estudio de los mecanismos dinámicos y termodinámicos de las sequías a diferentes escalas espaciales, desde la global a la regional.

A escala global se descubrió el efecto desigual que mecanismos como la Oscilación del Pacífico Sur-El Niño tienen sobre la aparición de sequías en diferentes regiones del globo. Los investigadores identificaron cómo los efectos de esta oscilación se propagan espacial y temporalmente a diferentes regiones, lo que abre la posibilidad de predecir las condiciones de sequía con una cierta fiabilidad en esas regiones con algunos meses de antelación.

El desarrollo en el CSIC de nuevas metodologías para la caracterización de los bloqueos anticiclónicos y de las situaciones de estancamiento atmosférico ha abierto la posibilidad de conocer en mejor medida la génesis de las sequías. Además de los estudios centrados en episodios específicos, se extraen amplias lecciones sobre las dificultades actuales en la predicción del fenómeno y abre líneas sobre dónde focalizar los esfuerzos de cara a la predicción a medio plazo.

Además, conocer cómo se ha comportado la sequía a lo largo del tiempo y el espacio resulta fundamental para determinar en qué medida el fenómeno cambia y si dichos cambios pueden ser atribuidos al actual proceso de cambio climático. Desde el CSIC se desarrollan estudios geológicos mediante el análisis de sedimentos lacustres para analizar grandes fluctuaciones climáticas a gran escala temporal, indicativas de periodos dominantemente secos. Estos estudios permiten poner en un gran contexto

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados



Probabilidad de ocurrencia de sequías en el mundo asociada a El Niño y La Niña. / CSIC

temporal la evolución de las sequías y determinar con mayor confianza el carácter excepcional que se está experimentando en la actualidad a consecuencia del forzamiento antropogénico causado por las emisiones de gases de efecto invernadero.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

A escala documental e instrumental, el CSIC ha investigado regionalmente en la reconstrucción de las sequías a partir de fuentes documentales de los cuatro últimos siglos; a escala global, los investigadores también han estudiado la dinámica espacio-temporal de la sequía meteorológica. Unos y otros han comprobado el carácter fundamentalmente estacionario de la sequía por la dinámica de la lluvia, su elevada variabilidad temporal y la intensificación de los episodios de sequía a causa del calentamiento global. Los estudios a nivel nacional han permitido comprobar que estos episodios son muy variables espacialmente y son escasos los que han afectado al conjunto del país. Las contribuciones de esta línea de investigación permiten conocer mejor el comportamiento de la sequía, un aspecto esencial para avanzar en la predicción y adaptación a la misma.

La predicción de las próximas condiciones de sequía de acuerdo a escenarios de cambio climático resulta fundamental para la gestión a largo plazo del riesgo. Desde el CSIC se ha trabajado en el análisis de las proyecciones futuras de este fenómeno y en la determinación de sus incertidumbres, desarrollando aspectos metodológicos clave que permitan su interpretación en escenarios de elevadas emisiones de gases de efecto invernadero, y poniendo el foco en cómo responderán los mecanismos fisiológicos de las plantas y se interpretarán en los modelos.

En el CSIC también se investiga desde hace más de diez años para mejorar el procesamiento de los modelos de cambio climático y de su detalle espacial a escalas regionales, y para reducir su incertidumbre. El resultado de las investigaciones han sido dos herramientas que permiten un acceso a los datos de los modelos climáticos de forma muy eficiente tanto a escala nacional como internacional. Estas facilitan a los gestores de administraciones públicas y empresas el acceso a los datos más actualizados y fiables sobre proyecciones futuras de sequía de cara a mejorar los planes de adaptación a largo plazo.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

2.2.

Adaptación de las plantas a la sequía y uso del agua en la agricultura

Ante la necesidad de producir más alimentos para una población en crecimiento a niveles sin precedentes, pero con recursos naturales cada vez más limitados, el CSIC está desarrollando líneas de investigación centradas en las plantas, el agua y el suelo para aumentar la productividad del agua. Aunque en los sistemas agrarios la protagonista es la planta, el agua y el suelo son elementos clave para su crecimiento y mayor rendimiento, y, por tanto, para la producción de alimentos vegetales.

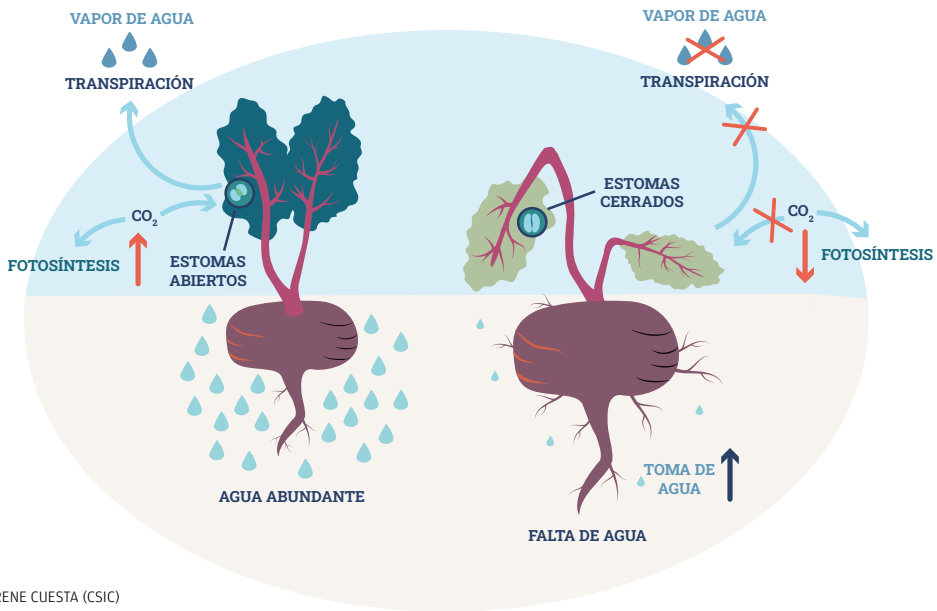
En el CSIC se están haciendo grandes esfuerzos para entender las respuestas que las plantas desarrollan a nivel fisiológico y molecular cuando están sometidas a condiciones de estrés por sequía, así como los rasgos de cada especie o variedad que definen sus diferentes respuestas. Esta información facilita el desarrollo de indicadores de suelo y planta y permite la aplicación de estrategias de riego más precisas y eficientes, con la finalidad de mejorar la eficiencia en el uso del agua en los cultivos.

Una de las primeras respuestas de las plantas a la sequía es el cierre de los estomas para evitar la pérdida de agua por la transpiración, lo que impacta negativamente en la fotosíntesis y, por tanto, en el crecimiento y desarrollo de las plantas. En la raíz, las plantas activan rápidamente mecanismos para estimular la toma de agua en el suelo, como son los cambios en el crecimiento de las raíces hacia zonas más profundas donde el agua es más abundante. Por tanto, desde el CSIC se estudia la regulación estomática, el transporte de agua y el desarrollo radicular emergen como estrategias clave para reducir el uso del agua en la agricultura y mejorar la resistencia al estrés por sequía en las plantas de cultivo.

La sequía también afecta a la nutrición de las plantas mediante la alteración de la toma y el transporte de nutrientes, lo que afecta negativamente a la toma de agua y la transpiración. En el CSIC, varios grupos de investigación trabajan para identificar los mecanismos moleculares y fisiológicos que regulan la toma y el transporte de iones como el potasio y el cloruro en las plantas, y cómo su aplicación agronómica puede mejorar los síntomas de la sequía en los cultivos.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

Gráfico 2.1 Respuestas fisiológicas de las plantas a la sequía



IRENE CUESTA (CSIC)

La identificación de mecanismos fisiológicos de respuesta a la sequía facilita la selección de variedades más resistentes y tolerantes al estrés hídrico. Esta información también es de gran utilidad para el estudio de los genes implicados en la respuesta al estrés hídrico mediante la mejora genética. En concreto, se trabaja en la identificación y caracterización de genes y rasgos de resistencia a la sequía en los parientes silvestres de los cultivos para introducirlos en variedades agrícolas importantes, con la finalidad de aumentar la productividad del agua, obtener nuevos cultivares y conseguir un mejor rendimiento, tolerancia y resiliencia de los cultivos a la sequía. Otra línea novedosa relacionada con lo anterior se centra en la evaluación de la poliploidía (más de dos copias de cromosomas) como característica

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

positiva para la tolerancia de las plantas a la sequía. En el CSIC también se están aplicando técnicas de la biomedicina a la biotecnología agrícola, como el uso de fármacos y de bioestimulantes con la finalidad de modificar respuestas de señalización de hormonas vegetales (el ácido abscísico o los brasinoesteroides) y otras respuestas fisiológicas que pueden mejorar la resistencia de las plantas a la sequía.

Además, desde el CSIC se trabaja para que los conocimientos adquiridos se transfieran al sector agrícola y la sociedad en general, lo cual es especialmente importante en el contexto actual de sequía. En general, las innovaciones no han sido adaptadas masivamente por el sector y se pretende cerrar la brecha con enfoques interdisciplinar de abajo hacia arriba, en un entorno abierto que haga un uso intensivo de las tecnologías emergentes para mejorar la sostenibilidad de la agricultura de regadío. Además, en algunos de los proyectos se incluyen análisis coste-beneficio, que permiten cuantificar las ventajas económicas de la utilización del modelo para la programación del riego con el fin de facilitar al usuario la decisión de adopción de estos sistemas.

Por otro lado, el conocimiento de la respuesta de los cultivos a la falta de agua en el suelo facilita el desarrollo de soluciones científicas y tecnológicas al problema de la sequía en el sector agrario. En concreto, facilita la aplicación y el desarrollo de enfoques tecnológicos innovadores que permiten progresar al sector en el ámbito de la digitalización y el uso sostenible del riego; este es también un campo de investigación que desarrollan diferentes grupos del CSIC. La agricultura de regadío es fundamental para la producción de alimentos, ya que, aunque ocupa tan solo el 17 % de la superficie mundial cultivada, produce el 40 % de los alimentos. Sin embargo, con una cada vez menor disponibilidad de agua para cubrir las necesidades de los cultivos, existe la necesidad de incrementar la productividad del agua. En este sentido, además de contribuir a la modernización de los sistemas de regadíos, el CSIC está avanzando en el uso de sensores proximales y remotos que ayuden a los agricultores a incrementar la productividad sin aumentar la cantidad de riego en un contexto de agricultura sostenible intensiva y digital. Dentro de los proxi-

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

males se están desarrollando y utilizando sensores en suelo, pero, sobre todo, en planta, ya que integran el estado hídrico del suelo y la atmósfera, además de la respuesta de la planta a las condiciones ambientales.

El amplio desarrollo de sensores (flujo de savia, variación del diámetro del tronco, presión de turgencia de las hojas, etc.) y sistemas de transmisión de datos facilitan su acceso en tiempo real, por lo que facilitan el seguimiento del estrés hídrico y la gestión del riego de forma más eficiente. Así, el objetivo final es el desarrollo de sistemas que decidan de forma inteligente cuándo y cuánto regar gracias a la determinación precisa del estado hídrico del cultivo, a lo que se pueden añadir variables ambientales o el periodo fenológico. Además, existen proyectos en los que se están desarrollando estos sistemas para cultivos sin suelo o con distintas calidades de agua. De hecho, un equipo de investigación del CSIC está trabajando en la utilización de aguas no convencionales para el riego. Con ello, pretenden mejorar las posibilidades de adaptación a la sequía reduciendo la presión sobre los recursos hídricos, ya que se sustituye el agua limpia por agua no convencional.

En el CSIC se estudian los genes implicados en la respuesta fisiológica al estrés hídrico mediante la mejora genética / CSIC

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

En el contexto de la agricultura digital e inteligente, también se están desarrollando herramientas para el diagnóstico del estado hídrico de los cultivos con sensores remotos (imágenes térmicas, cámaras multiespectrales e hiperespectrales, fluorómetros, etc.) y uso de satélites y drones. En este sentido, en el CSIC se están desarrollando indicadores derivados de información térmica, multi- e hiperespectral para la monitorización del estado hídrico y programación del riego. Estas mismas técnicas también se están desarrollando para la cuantificación de la evaporación del suelo y la transpiración de los cultivos para incorporar el componente espacial mediante teledetección a los modelos de programación del riego en áreas amplias. La estimación de la evapotranspiración es un aspecto muy complejo, pero resulta crítico para la adecuada determinación de las demandas de riego y la optimización de las reservas de agua disponibles, que se ven muy afectadas por los periodos secos. También se investiga para desarrollar e implementar estas y otras nuevas tecnologías y procedimientos digitales innovadores con el objetivo de mejorar la eficiencia del riego, utilizando soluciones sencillas de bajo coste (*hardware low-cost*, modelos simplificados basados en datos, *software* de código abierto integrado en plataformas de fácil uso, etc.), de forma que se facilite su uso a pequeños agricultores.

A través de estos conocimientos y bases de datos producidas por los sensores, tanto en campo como remotos, en el CSIC se están desarrollando modelos agronómicos avanzados para determinar la evapotranspiración de los cultivos e integrarlos en sistemas de ayuda a la toma de decisión para la programación del riego de forma más eficiente en función del tipo de cultivo, clima y cantidad y calidad del agua disponible para este fin. Idealmente, estos modelos deberían estar fundamentados explícitamente en los mecanismos fisiológicos subyacentes a la respuesta de las plantas al déficit hídrico del suelo para que proporcionen una compresión integrada de los resultados de los sensores y puedan ser extrapolables a escalas espaciales y temporales diferentes de donde han sido calibrados, por lo que desde algunos grupos del CSIC se trabaja en este sentido. Esta característica los diferencia de aquellos desarrollados por inteligencia artificial, que también se utilizan para la gestión de las bases de datos. En los sistemas de ayuda a la decisión también se están utilizando los avances proporcionados por el llamado *Internet de las cosas*.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

Las medidas que se tomen sobre el manejo de agua están estrechamente relacionadas con el suelo, ya que ambos están íntimamente relacionados. Por tanto, parte de la investigación que se está haciendo en el ámbito agrario en relación a la sequía se centra en promover prácticas agrícolas sostenibles que favorezcan la capacidad del suelo para retener del agua, de manera que se reduzca el impacto de la sequía; sería el caso de la disminución de la aplicación de insumos como el riego. El CSIC, a través de diversos proyectos, está evaluando en este sentido el impacto de la diversificación de cultivos sobre la eficiencia en el uso del agua. También se están valorando diferentes prácticas agrícolas sostenibles que permitan controlar problemas derivados de la sequía, como la erosión. Asimismo, en los últimos años se está investigando el impacto de las prácticas de manejo de los agroecosistemas sobre los servicios que brindan. Algunas de las líneas más novedosas respecto a aumentar la retención del agua en el suelo son aquellas que pretenden una mejora de las propiedades físicas y químicas, así como de la estructura, del suelo mediante el manejo de nutrientes minerales y orgánicos que provienen de la transformación de residuos agrícolas o urbanos, y con la ayuda de distintas tecnologías. Además, se está tratando de identificar microorganismos con actividades promotoras del crecimiento vegetal, útiles para mejorar la productividad de las especies cultivadas. Los investigadores, además, están evaluando además el efecto de la comunidad microbiana en suelos de agroecosistemas regados con agua desalinizada y su interacción con enmiendas orgánicas. El uso de microorganismos endófitos y epífitos como agentes probióticos de las plantas representa una alternativa al uso de agroquímicos y un paso adelante en la mejora vegetal, contribuyendo así a una agricultura más sostenible.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

2.3.

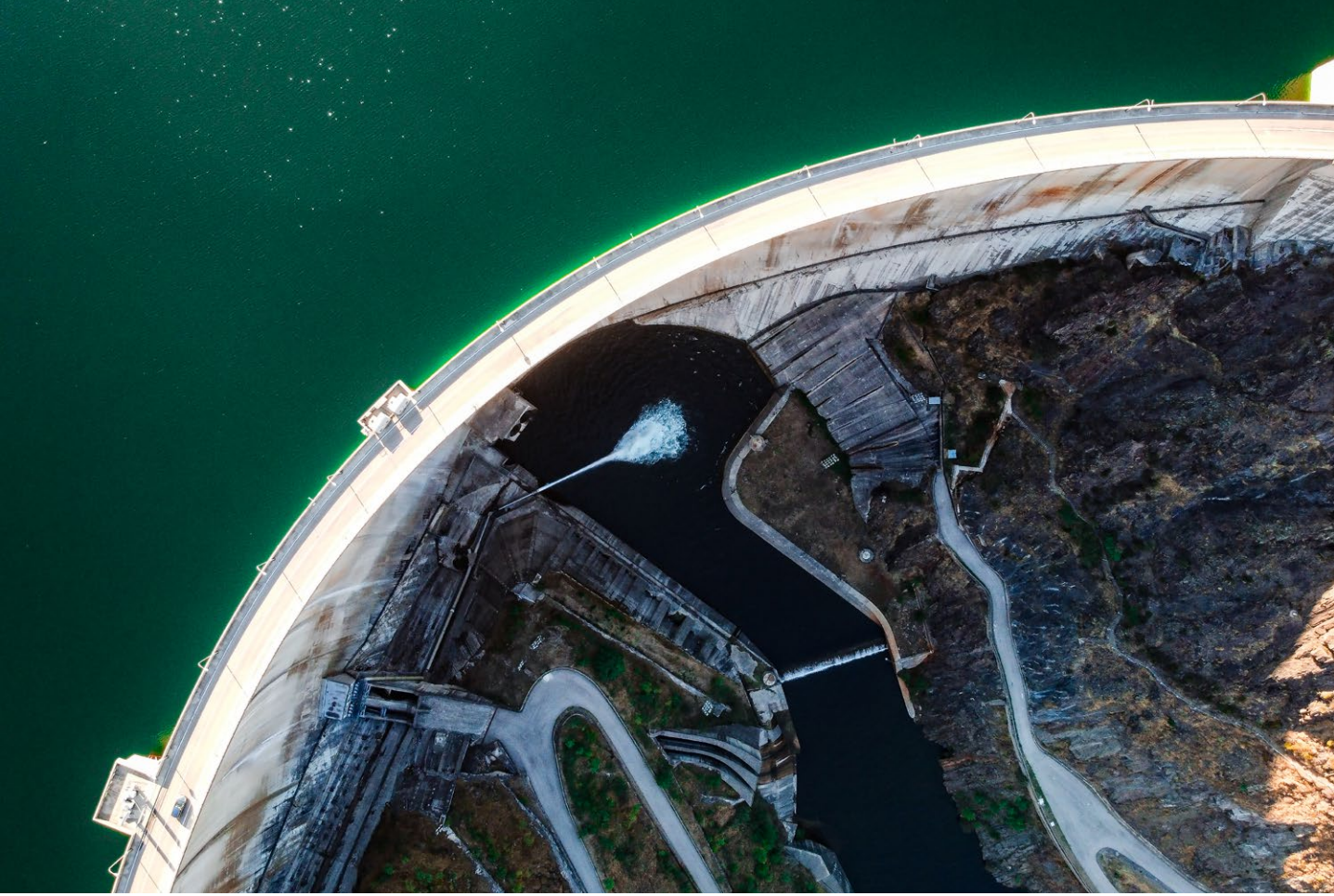
La sequía desde una perspectiva hidrológica

El estudio de las sequías hidrológicas es una de las principales líneas de investigación desarrolladas del CSIC, con estudios que van desde la monitorización de cuencas aforadas en zonas de montaña hasta otros de carácter continental. Gracias a esto, los investigadores han comprobado el importante papel que presentan los cambios en la cubierta vegetal para explicar la producción de escorrentía superficial y las curvas de recesión anuales. Gracias a los experimentos de campo desarrollados desde hace más de veinte años por un equipo multidisciplinar del CSIC, se ha podido comprobar cómo los procesos de revegetación generalizados en la montaña mediterránea son fundamentales para explicar la reciente evolución de los caudales y la intensificación de las sequías hidrológicas. Los estudios a escalas espaciales más amplias han permitido comprobar cómo las sequías hidrológicas responden de forma muy diversa a las condiciones de sequía meteorológica en función del sistema que se esté analizando, con respuestas más rápidas en las zonas de cabecera de montaña y más lentas en los cursos medios de los grandes ríos y en los sistemas embalsados.

En algunos sistemas hidrológicos se ha comprobado cómo la gestión hidrológica es un factor preponderante para generar condiciones de sequía aguas abajo. Además, los investigadores han documentado cómo las sequías hidrológicas se están recrudeciendo en España a consecuencia fundamentalmente de las demandas de agua por parte de los regadíos. También han determinado que las variaciones espaciales en las sequías hidrológicas a nivel europeo responden fundamentalmente a los cambios en la utilización del agua más que a los procesos de cambio climático.

Desde la perspectiva de las aguas subterráneas, en el CSIC se investiga en diferentes líneas para mejorar el conocimiento de los acuíferos españoles. Se ha apostado por la modelización matemática de los mismos para comprender mejor su hidrodinámica y valorar el impacto del cambio climático sobre los recursos renovables de aguas subterráneas. Algunos de los estudios en los que se trabaja en la actualidad prestan especial atención a los

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados



Los investigadores han documentado cómo las sequías hidrológicas se están recrudeciendo en España a causa de la demanda de los regadíos. / ISTOCK

posibles efectos sobre los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas, en particular los humedales, como Doñana o el Mar Menor; la relación entre la explotación intensiva, el descenso de los niveles piezométricos y el hundimiento de la superficie del terreno; los cambios en la calidad de las aguas subterráneas en los acuíferos costeros debido a la intrusión marina; la delimitación de las divisorias hidrogeológicas en las masas de agua compartidas entre diferentes demarcaciones hidrográficas; el estudio de las relaciones río acuífero; el estudio de técnicas ancestrales (como las acequias de recarga o careos) de manejo del agua superficial y subterránea como herramienta para superar los efectos del cambio climático; o la mejora de los abastecimientos urbanos en las pequeñas poblaciones de la España vaciada.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Desde el CSIC también se investiga en la recarga gestionada de acuíferos con agua regenerada, la reutilización de agua con sistemas ecoeficientes, el estudio de sistemas kársticos complejos, la salinización de aguas y su impacto sobre los ecosistemas, el análisis de lagos en el contexto de cambio global, la contaminación de las aguas subterráneas en contextos de escasez y el estudio de macroinvertebrados acuáticos como indicadores del cambio climático en ríos.

En cuanto a impactos sobre los ciclos biogeoquímicos, los centros del CSIC realizan ciencia puntera en impactos sobre aspectos relacionados con la polución en sistemas hidrogeoquímicos como los acuíferos. Equipos del CSIC trabajan en el análisis de los contaminantes del agua en cursos fluviales para determinar las implicaciones en el reciclado de las aguas y su utilización para abastecimientos urbanos o usos agrícolas. En este sentido, se han analizado los efectos de las sequías sobre la geoquímica y la bioquímica de cauces fluviales, que afectan al contenido de materia orgánica disuelta, al ciclado de nutrientes, a la concentración de contaminantes, y tienen consecuencias sobre los ecosistemas fluviales y a su transporte a lo largo de las cuencas fluviales.

En los estudios del CSIC se pone de manifiesto la elevada relación existente entre las condiciones de sequía hidrológica y los valores de temperatura del agua, lo que demuestra la necesidad de mantener unos adecuados niveles de caudal para controlar procesos que alteren la calidad.

Por otro lado, actualmente en esta institución se trabaja en el desarrollo de sistemas ecoeficientes para el tratamiento y reutilización de aguas residuales en la región mediterránea. Y es que, se ha comprobado que, durante los episodios de estiaje se produce una reducción del aporte de nutrientes desde los ecosistemas terrestres y también situaciones de falta de oxígeno y eutrofización, lo que afecta notablemente sobre la salud de las masas de agua.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

24.

La sequía desde una perspectiva ecológica y ambiental

La investigación española sobre sequía en los campos de la ecología del cambio global y las ciencias forestales y del suelo es de gran calidad y cantidad. La aportación de grupos del CSIC ha sido fundamental. Por ejemplo, mediante experimentos a largo plazo de exclusión de lluvia se ha constatado cómo los episodios de sequía reducen el crecimiento, la productividad y la capacidad reproductiva de distintas especies de árboles y arbustos. También se ha medido hasta qué punto algunas especies de plantas mediterráneas se aclimatan y son capaces de tolerar sequías severas o largas modificando sus tasas de crecimiento o de captura de carbono. Además, se ha observado que la sequía puede interaccionar con organismos patógenos del suelo y reducir sus impactos sobre los árboles, ya que algunos suelen requerir de cierta humedad del suelo.

Estos estudios prospectivos y experimentales se han complementado con estudios retrospectivos y observacionales basados en datos dendrocronológicos (anillos de crecimiento) y en redes de daños forestales que existen a nivel regional. De esta manera, se han podido ligar episodios de decaimiento y mortalidad forestal con sequías y cuantificar, de esta forma, el periodo de recuperación del crecimiento y la productividad en España e, incluso, a escala global.

También se ha comprobado a niveles regionales y globales la respuesta de la actividad fotosintética de la vegetación a la ocurrencia de sequías mediante imágenes de satélite, comprobando la respuesta desigual de los ecosistemas a los periodos secos y determinando cómo el incremento de la demanda de agua por parte de la atmósfera aumenta el estrés de los ecosistemas y afecta a los procesos de degradación en zonas sobreexplotadas.

Otras líneas observacionales se han centrado en los impactos de las sequías sobre el funcionamiento de los suelos y la productividad de ecosistemas ibéricos icónicos como las dehesas. Así, se ha constatado que el déficit hídrico reduce la biomasa microbiana del suelo, lo que perjudica la captación de nutrientes por las raíces de los árboles.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

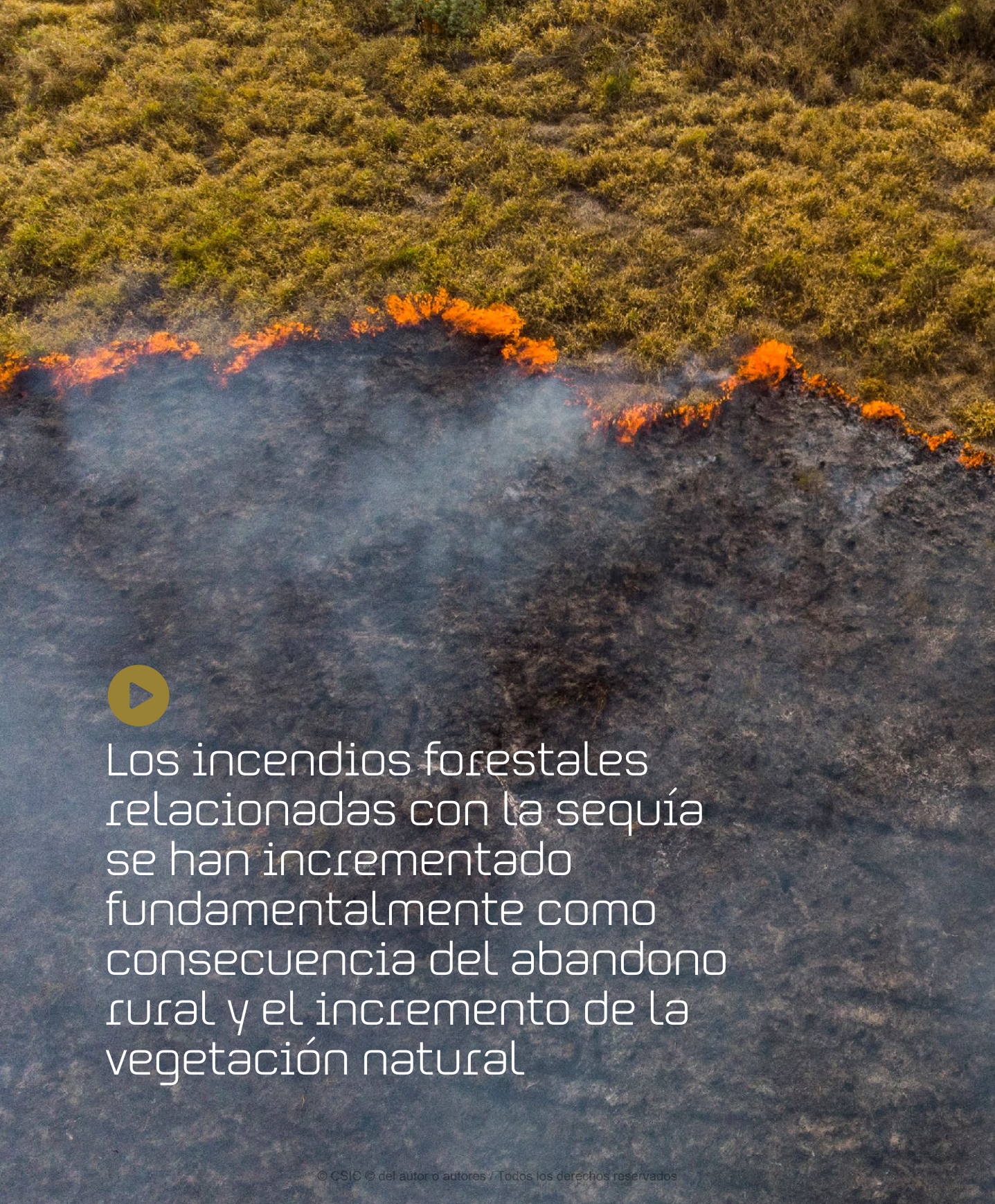
A nivel ecosistémico, grupos del CSIC han constatado impactos negativos de la sequía sobre la productividad y la fenología de comunidades vegetales de Doñana mediante el uso de sensores remotos combinados con torres de flujo de gases.

Otros estudios de la institución han evaluado, en las zonas de clima semiárido del sudeste y nordeste españoles, las respuestas de las comunidades vegetales a la sequía, detectando cambios en las interacciones entre especies de plantas, en la composición química de sus tejidos o en cómo toman agua y nutrientes del suelo. Por otro lado, los investigadores han constatado que en las zonas de clima mediterráneo la sequía está a menudo ligada a lluvias torrenciales, que provocan la erosión y pérdida de suelos y de vegetación. A nivel global, estudios del CSIC han constatado que la sequía puede interaccionar con otros componentes del cambio global y aumentar el estrés sobre los ecosistemas edáficos reduciendo sus servicios ecosistémicos.

La sequía también afecta a la composición química de las plantas, según se ha comprobado en el CSIC. Esto impacta sobre los animales consumidores y sus dietas y modifica las redes tróficas. Por ejemplo, los programas de seguimiento realizados en Doñana por un equipo de investigación han constatado reducciones históricas en las poblaciones de aves ligadas a sequías severas, como la que arrastra España desde 2022.

Desde el CSIC se analizan los efectos de las sequías sobre la multiplicación de incendios forestales. Los investigadores han comprobado que la vulnerabilidad de los bosques a la exposición de incendios forestales relacionados con la sequía se ha incrementado de forma muy notable, fundamentalmente como consecuencia del abandono rural y el incremento de la vegetación natural, que ha producido que los periodos secos sean actualmente uno de los fenómenos que condiciona en mayor medida la ocurrencia de los fuegos. También se estudian los impactos de sequías e incendios sobre especies forestales, con énfasis en episodios de decaimiento y en el uso de quemas prescritas para mitigar impactos negativos de la falta de agua.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es



Los incendios forestales relacionadas con la sequía se han incrementado fundamentalmente como consecuencia del abandono rural y el incremento de la vegetación natural

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

La gestión forestal tiene un papel fundamental en la adaptación de las masas forestales a la sequía. El CSIC lidera una investigación sobre la capacidad de ciertas prácticas silvícolas, como el aclareo (el manejo adecuado de la densidad de las masas forestales), para mejorar la adaptación de los bosques y las repoblaciones a la sequía. En concreto, equipos de investigación han comprobado que el aclareo incrementa la resistencia de los árboles a la sequía, maximiza el crecimiento durante los episodios secos, y acelera la recuperación de las masas forestales tras la sequía (mejora la resiliencia). La línea de investigación actual se centra en conocer mejor los mecanismos fisiológicos que explican esa mejor adaptación y en determinar con precisión las densidades óptimas para distintas especies y climas.

Desde el CSIC se ha estudiado en profundidad la sensibilidad de la respiración del suelo a la sequía, aspecto que tiene importantes implicaciones para el balance neto de carbono. Los estudios se han desarrollado a través de parcelas experimentales instaladas en el campo y han comprobado el enorme papel de la humedad del suelo sobre los flujos de CO_2 y el papel preponderante de las tormentas estivales en explicar las variaciones interanuales de dichos flujos. Se ha concluido que la degradación del suelo interactúa con la humedad del suelo en las regiones áreas, con importantes implicaciones para el balance de carbono de estos ecosistemas.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

Otro equipo de investigación trabaja en el intercambio de flujos de CO_2 entre la superficie terrestre y la atmósfera en ecosistemas semiáridos, en particular dirimiendo el papel de los procesos biológicos y no biológicos en el proceso. Este trabajo pone de manifiesto que estos ecosistemas se convierten en emisores netos de CO_2 durante los episodios secos. En este sentido, desde otro instituto del CSIC han comprobado que la respiración del suelo y los intercambios de CO_2 atmosférico están más afectados por las sequías que por la cantidad de nutrientes presentes en el suelo. Además, han comprobado que los efectos de esta anomalía temporal sobre la respiración del suelo se pueden prolongar una vez terminada debido a la alteración de las comunidades microbianas del suelo.

Desde otros grupos de investigación, mediante la comparación de los flujos de CO_2 entre zonas degradadas semiáridas y de vegetación en buen estado, se ha comprobado las enormes diferencias para responder a la sequía entre ambas zonas y se ha mostrado, así, que las zonas degradadas son elevadas emisoras de CO_2, mientras que las zonas en buen estado de conservación secuestran carbono de forma neta. Estos resultados tienen amplias implicaciones para la gestión y conservación de los ecosistemas semiáridos.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

2.5.

La sequía desde una perspectiva socioeconómica

Debido a su complejidad, no existen estadísticas ni una estimación fiable sobre los impactos, tanto directos como indirectos, que las sequías pueden producir. Esta cortapisa limita enormemente la estimación de la vulnerabilidad ante la sequía y del riesgo que ocasiona. En un equipo multidisciplinar del CSIC se ha testado la capacidad de diferentes índices de sequía climática para identificar su efecto sobre las producciones de cultivos de secano y sobre la actividad y producción forestal. Estas investigaciones han permitido identificar los indicadores más útiles para cada territorio y cada sector, con una clara utilidad en el desarrollo de sistemas de monitorización y alerta temprana de la sequía más eficaces. Además, actualmente algunos investigadores están usando tecnologías de inteligencia artificial con la finalidad de estimar el impacto social y económico de las sequías a través de los enormes volúmenes de información documental disponible en archivos y hemerotecas.

El CSIC también estudia las sequías desde el punto de vista de su gestión institucional. En concreto, se ha estudiado el comportamiento social respecto a las medidas de gestión de los recursos hídricos para hacer frente a la sequía. Los resultados han comprobado cómo la aceptación general de mantener una política hidráulica basada en la construcción de obras públicas se ha reducido en los últimos años. Sin embargo, existen notables resistencias desde el sector agrícola para llevar a cabo un cambio de paradigma hacia soluciones centradas en la gestión de la demanda. Conocer cuál es la percepción social de distintos modelos de gobernanza del agua y sus alternativas resulta de notable importancia para mejorar la gestión de las sequías desde un punto de vista institucional.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

tres

Conclusiones y recomendaciones

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

Conclusiones

La sequía es **el riesgo hidroclimático más complejo** que existe. Es difícil cuantificar su severidad, extensión superficial y los impactos que produce. Esto se debe a la existencia de diferentes tipos de sequía y a su propagación a lo largo del tiempo, del espacio y de diferentes sistemas naturales y socioeconómicos, con innumerables impactos de carácter indirecto. Todo ello complica tanto su estudio como el establecimiento de adecuadas medidas de adaptación y mitigación del riesgo que conlleva.

La sequía **afecta a todas las regiones del mundo**, independientemente de que su clima sea seco o húmedo. Se caracteriza por una **elevada variabilidad temporal** y por la imposibilidad de su predicción. En las últimas décadas asistimos a un recrudecimiento de la severidad de los periodos secos, no como consecuencia de los cambios en las precipitaciones, que son poco significativos, sino debido al incremento de la demanda de agua por parte de la atmósfera, que se ha incrementado notablemente debido al calentamiento global. Además, los excesos de demanda por parte de algunos sectores están produciendo que la severidad de las sequías hidrológicas se incremente notablemente. Para el futuro, debido a los procesos de cambio climático, se espera que la severidad y frecuencia de la sequía se incremente notablemente.

La sequía **impacta negativamente a múltiples tipos de sistemas desde los agrícolas y ganaderos a los ecológicos,** generando dramáticas pérdidas económicas, pero también reduciendo la provisión de servicios ecosistémicos. Tiene un impacto negativo en la productividad y en el rendimiento y la calidad de los cultivos y de los bosques debido a la pérdida de turgencia celular, la reducción en la asimilación de CO_2 y en las tasas de crecimiento, el aumento de estrés oxidativo y desequilibrio nutricional. Esto conlleva una disminución en la producción y calidad de los alimentos y de los productos forestales madereros y no madereros (frutos, corcho, trufa), un aumento de los precios y pérdida de ingresos para los agricultores y para el sector forestal.

La sequía **afecta directamente a la ganadería** al reducir la disponibilidad de pastos y comprometer la producción de cultivos clave para la alimentación del ganado. Además, impacta en la práctica de la trashumancia, dificultando los desplazamientos estacionales de los rebaños y contribuyendo a la degradación del suelo. Esto tiene importantes implicaciones económicas y nutricionales para la industria ganadera.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

La sequía **compromete la capacidad de captación de CO_2 por los bosques y su potencial de mitigación del cambio climático**, dando lugar a fenómenos de decaimiento forestal y mortalidad de árboles. Podría transformar algunos bosques de sumideros en fuentes de carbono, generando una retroalimentación positiva sobre el cambio climático. Además, aumenta la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales frente a otras perturbaciones, como los incendios, reduciendo su biomasa y biodiversidad, alterando las redes tróficas y, a menudo, convirtiéndolos en comunidades más tolerantes al déficit hídrico, como las arbustivas o algunas dominadas por especies de robles y encinas, en detrimento de las coníferas.

La lucha contra la sequía **requiere de una visión integral del agua en las cuencas hidrográficas,** así como de un **conocimiento más detallado y continuamente actualizado aplicado a su gestión,** que permitan comprender su dinámica y las características de todas las fases del ciclo hidrológico local, con especial hincapié en el papel estratégico que las aguas subterráneas y el uso conjunto de estas y las aguas superficiales pueden jugar en la superación de episodios secos coyunturales y estructurales.

En muchos institutos del CSIC se están desarrollando **investigaciones sobre la sequía abordadas por disciplinas muy diversas** que van desde la climatología a la agronomía, pasando por la hidrología, la ecología y las ciencias forestales, etc. Estas investigaciones están llevando a cabo contribuciones decisivas, con un impacto científico y socioeconómico muy notable, que profundizan en el conocimiento del fenómeno y en la búsqueda de soluciones eficientes que nos permitan adaptarnos mejor al riesgo de sequía y mitigar mejor sus impactos.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

Recomendaciones

Las **medidas encaminadas a reducir el riesgo de sequía** pueden ser muy diversas y estar enfocadas a sectores muy diferentes. Desde la amplia experiencia española, caracterizada por éxitos y fracasos en la adaptación a la sequía, se pueden extraer recomendaciones para desarrollar dentro y fuera de nuestro país. Estas deberían ser útiles para mitigar los efectos de todos los tipos de sequía (agrícola, ecológica, hidrológica y socioeconómica) y, en el caso de los recursos hídricos, para alentar tanto el incremento en la disponibilidad de agua como en el control de la demanda. Por ejemplo, se pueden desarrollar actuaciones que aumenten la generación de escorrentía y la infiltración de agua en las zonas de cabecera de cuenca mediante una gestión forestal más eficiente que evite que el incremento de los bosques en las zonas de montaña comprometa la disponibilidad de agua río abajo.

Las acciones encaminadas a **reducir la exposición a la sequía** pueden ser muy diversas, e incluyen la reducción de las demandas de agua, el cultivo de especies y variedades mejor adaptadas a las condiciones de escasez de agua, la optimización del uso del agua mediante estrategias de fertirriego sostenibles, la diversificación de las fuentes de alimento del ganado, la mejora de la gestión de las zonas regadas, etc.

La **reducción de la vulnerabilidad de sociedades y ecosistemas** también puede conseguirse mediante una mejor conservación y gestión de las zonas de pasto y de los bosques; medidas de almacenamiento de agua; infraestructuras hidráulicas; una agricultura de conservación o uso de enmiendas orgánicas que mejore la capacidad de retención de agua en el suelo y favorezca la economía circular; con el fin todo ello de maximizar el secuestro de materia orgánica (carbono) en el suelo, el desarrollo de planes de gestión de la sequía adaptados a los recursos hídricos de cada región, etc.

A escala local, las medidas que se pueden desarrollar afectarían a las masas de agua. Las soluciones pasan por la **optimización de la gestión de los embalses y las aguas subterráneas, y también de las infraestructuras hidráulicas,** mediante la mejora de los sistemas de abastecimiento y regadío para limitar las pérdidas de agua o mediante el reciclaje de agua.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

El caso de las **aguas subterráneas** puede considerarse especial, pues, aunque la sequía afecta negativamente a la recarga de los acuíferos, su volumen normalmente tiene un tiempo de respuesta muy largo, por lo que tarda mucho en verse afectados. Por esta razón, en muchos lugares las aguas subterráneas pueden ser utilizadas puntualmente, de manera intensiva, para paliar los déficits ocasionados por la sequía. Estos periodos de uso intensivo deben ir seguidos de épocas de descanso cuando la recarga es más abundante para que los volúmenes extraídos de los acuíferos se recuperen. Este tipo de estrategias deben llevarse a cabo considerando los caudales ambientales necesarios para el mantenimiento de las descargas naturales (manantiales y surgencias submarinas). En este sentido, el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas constituye, en muchos casos, la herramienta de adaptación a la sequía más robusta desde el punto de vista de la gestión sostenible de los recursos hídricos. Por ello, se ha de evitar la contaminación de estos acuíferos a largo plazo.

La cantidad de **medidas que pueden llevarse a cabo en el sector agrícola a escala local** son múltiples. Entre ellas se incluyen la selección de especies y variedades resistentes al déficit de agua o que muestren una mayor eficiencia en el uso del agua, obtenidas mediante la selección de genes o rasgos de resistencia en programas exhaustivos de mejora genética. Los mayores avances en eficiencia en el uso del agua se pueden conseguir mediante el aumento de la productividad del agua en los cultivos, es decir, la cantidad de producto generado, ya sea grano, biomasa u otra variable, por unidad de agua consumida. La reducción del consumo de agua en la agricultura mediante la mejora o implementación de sistemas y estrategias de riego más eficientes es otra de las grandes oportunidades que se proponen para reducir el consumo de agua en la agricultura, sin perjudicar la cosecha. Para ello, se puede hacer uso del desarrollo de dispositivos novedosos y económicos que consigan monitorear eficientemente el estado hídrico de las plantas cultivadas. El uso de modelos mecánicos que se integren en sistemas de ayuda a la decisión de riego pueden ser de gran utilidad para interpretar los resultados de estos dispositivos y optimizar esta labor. Además, también es importante mejorar el control de la erosión del suelo y una gestión integral de su fertilidad mediante la rotación de cultivos o laboreos menos intensivos. Esto mantendría una cobertura vegetal en los cultivos el mayor tiempo posible (especialmente durante las estaciones más secas) mediante la aplicación de enmiendas orgánicas que provienen de la economía circular, lo que favorecería la retención de agua y el almacenamiento de materia orgánica, que, a su vez, disminuiría las necesidades de fertilización y riego.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

En el caso de las actividades ganaderas, las medidas pueden incluir las **mejoras de acceso a las fuentes de agua por parte del ganado, de la rotación estacional del pastoreo y la movilidad, e incluso de la gestión de los pastizales** mediante diferentes especies animales o una presión ganadera adecuada que impida la sobreexplotación y los procesos de erosión. En el caso de las zonas forestales, se puede optimizar la gestión de los bosques para evitar que una densidad excesiva de árboles produzca una gran competencia por los recursos disponibles y aumente la vulnerabilidad de estos ecosistemas frente a situaciones de decaimiento y mortalidad durante episodios de sequía, pero también para la reforestación con especies o variedades adaptadas al medio y que toleren o resistan la sequía. La gestión forestal debe estar encaminada a crear paisajes estructural y funcionalmente más diversos, que sean más resilientes frente a sequías y otras perturbaciones. Habrá que habituarse a bosques más abiertos, a menudo coexistiendo con matorrales o pastos, menos productivos, que acumulen menos combustible y que tengan mayor eficiencia en el uso del agua.

A escala de cuenca hidrográfica es muy necesaria la **generación de planes de sequía de cuenca que aumenten la eficacia de la gestión de los recursos hídricos** cuando se producen periodos secos, desarrollando sistemas de monitorización y alerta temprana que resulten óptimos y se adapten a las características regionales, y umbrales de alerta y actuaciones establecidas *a priori* con el objetivo de hacer más eficientes los recursos disponibles y evitar en la medida de lo posible restricciones de agua. Los sistemas de monitorización pueden integrarse con sistemas de medida de impactos como, por ejemplo, las redes de sanidad forestal, que evalúan la defoliación de los árboles y que pueden complementarse con datos de teledetección.

A escala nacional se pueden establecer **sistemas de monitorización de sequías que ayuden a la toma de decisiones más eficaces** durante los episodios secos, medidas de regulación hidrológica, medidas de incentivo agrario como subvenciones y subsidios para modernizar regadíos y mejorar su eficiencia, y el desarrollo de programas de asesoramiento a agricultores y ganaderos que luego puedan implementarse a nivel regional y local.
La creación y gestión de un sistema de aseguramiento agrario es también una medida que se debe gestionar a nivel nacional y que, como se ha comprobado en España, ha tenido un enorme éxito para reducir los impactos de la sequía. Finalmente, la intervención en los mercados para hacer frente a problemas económicos o financieros que pudieran derivarse de la sequía también es una potencial acción a nivel estatal.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

A nivel de organismos multinacionales, como es el caso de la Unión Europea, se pueden plantear **medidas de cooperación en la gestión de los recursos hídricos,** muy necesarias en cuencas transfronterizas; **el desarrollo de directivas y legislación común** para mejorar la gestión de la sequía, como es el caso de la Directiva marco del agua; o el **control de precios de los productos agrícolas o de los insumos necesarios por las explotaciones,** por ejemplo, a nivel energético. A nivel multilateral y global, es posible negociar mecanismos regionales de compensación, el desarrollo de subsidios o la creación de una hoja de ruta de recomendaciones de mitigación de los impactos de la sequía desde los organismos internacionales competentes.

Finalmente, cabe destacar que, para que las medidas proactivas de gestión de la sequía tengan éxito, es necesario contar con los **agentes fundamentales a niveles local y regional,** ya que ellos son los conocedores de las características y problemáticas existentes a nivel específico. En estos agentes habría que incluir a las asociaciones de agricultores, los organismos gestores de cuenca, gobiernos regionales, agentes del sector financiero, asociaciones ecologistas, comunidades de regantes, agricultores y propietarios forestales, ayuntamientos, etc. La coordinación entre todos ellos es muy necesaria, ya que es indispensable considerar los diferentes intereses de cada sector, que a menudo resultan divergentes, y desarrollar medidas consensuadas que permitan hacer frente a la sequía de forma eficiente, generando ecosistemas y sociedades resilientes a la misma.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

cuatro

Listado de centros

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

CENTRO	PÁGINA WEB	CORREO ELECTRÓNICO
Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS, CSIC)	www.cebas.csic.es	direccion.cebas@csic.es
Centro de Estudios Avanzados de Blanes (CEAB, CSIC)	www.ceab.csic.es	direccion.ceab@csic.es
Centro de Investigación Agrigenómica (CRAG, CSIC-IRTA-UAB-UB)	www.cragenomica.es	direccion.crag@csic.es
Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales (CREAF, CSIC-IRTA-UAB-UB-IEC-Generalitat de Catalunya)	www.creaf.cat/es	direccion.creaf@csic.es
Centro de Investigación sobre Desertificación (CIDE, CSIC-UV-Generalitat Valenciana)	www.csic.es/es/investigacion/institutos-centros-y-unidades/centro-de-investigaciones-sobre-desertificacion	direccion.cide@csic.es
Estación Biológica de Doñana (EBD, CSIC)	www.ebd.csic.es	direccion.ebd@csic.es
Estación Experimental de Aula Dei (EEAD, CSIC)	www.eead.csic.es	direccion.eead@csic.es
Estación Experimental de Zonas Áridas (EEZA, CSIC)	www.eeza.csic.es	direccion.eeza@csic.es
Estación Experimental del Zaidín (EEZ, CSIC)	www.eez.csic.es	direccion.eez@csic.es
Geociencias Barcelona (GEO3BCN, CSIC)	www.geo3bcn.csic.es	direccion.geo3bcn@csic.es
Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (IACT, CSIC-UGR)	www.iact.ugr-csic.es	direccion.iact@csic.es
Instituto de Agricultura Sostenible (IAS, CSIC)	www.ias.csic.es	direccion.ias@csic.es
Instituto de Agrobiotecnología (IDAB, CSIC-Gobierno de Navarra)	www.idab.csic.es	direccion.idab@csic.es

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

CENTRO	PÁGINA WEB	CORREO ELECTRÓNICO
Instituto de Biología Molecular y Celular de Plantas Primo Yufera (IBMCP, CSIC-UPV)	www.ibmcp.upv.es	direccion.ibmcp@csic.es
Instituto de Ciencias Agrarias (ICA, CSIC)	www.ica.csic.es	direccion.ica@csic.es
Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA, CSIC)	www.idaea.csic.es	direccion.idaea@csic.es
Instituto de Economía, Geografía y Demografía (IEGD, CSIC)	www.iegd.csic.es	direccion.idaea@csic.es
Instituto de Estudios Sociales Avanzados (IESA, CSIC)	www.iesa.csic.es	direccion.iesa@csic.es
Instituto de Física de Cantabria (IFCA, CSIC-UC)	www.ifca.unican.es	direccion.ifca@csic.es
Instituto de Geociencias (IGEO, CSIC-UCM)	www.igeo.ucm-csic.es	direccion.igeo@csic.es
Instituto de Hortofruticultura Subtropical y Mediterránea La Mayora (IHSM, CSIC-UMA)	www.ihsm.uma-csic.es	direccion.ihsm@csic.es
Instituto de Investigación en Inteligencia Artificial (IIIA, CSIC)	www.iiia.csic.es	direccion.iiia@csic.es
Instituto de Productos Naturales y Agrobiología (IPNA, CSIC)	www.ipna.csic.es	direccion.ipna@csic.es

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

CENTRO	PÁGINA WEB	CORREO ELECTRÓNICO
Instituto de Química Física Blas Cabrera (IQF, CSIC)	www.iqfr.csic.es	direccion.iqfr@csic.es
Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca (IRNASA, CSIC)	www.irnasa.csic.es	direccion.irnasa@csic.es
Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS, CSIC)	www.irnas.csic.es	direccion.irnas@csic.es
Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC)	www.igme.es	sec.dg@igme.es
Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA, CSIC)	www.inia.es	direccion.general@inia.es
Instituto Pirenaico de Ecología (IPE, CSIC)	www.ipe.csic.es	direccion.ipe@csic.es
Misión Biológica de Galicia (MBG, CSIC)	www.mbg.csic.es/es	direccion.mbg@csic.es
Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN, CSIC)	www.mncn.csic.es	direccion.mncn@csic.es

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Ciencia para las Políticas Públicas

Informe de transferencia de conocimiento

CSIC
Consejo Superior de Investigaciones Científicas

Gobierno de España
Ministerio de Ciencia e Innovación

SCIENCE 4 POLICY